

# Entwicklung von Bedüsungskonzepten unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse für die technische Staubbekämpfung im Steinkohlenbergbau

Dissertation  
zur Erlangung des Grades eines Doktors  
der Ingenieurwissenschaften

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. John-Glen Swanson  
aus Portland, Oregon

genehmigt von der Fakultät für  
Energie- und Wirtschaftswissenschaften  
der Technischen Universität Clausthal

Tag der mündlichen Prüfung  
12. Dezember 2011

**Bibliografische Information Der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Vorsitzender der Promotionskommission:	Prof. Dr.-Ing. Norbert Meyer
Hauptberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Oliver Langefeld
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Mathias Bauer

Dissertation Clausthal 2012

**D 104**

© PAPIERFLIEGER VERLAG GmbH, Clausthal-Zellerfeld, 2012  
Telemannstraße 1 · 38678 Clausthal-Zellerfeld  
[www.papierflieger.eu](http://www.papierflieger.eu)

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Wege (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2012

**ISBN 978-3-86948-226-2**



# Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift habe ich auf der Grundlage meiner Forschungsarbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bergbau der Technischen Universität Clausthal angefertigt. An dieser Stelle möchte ich den Menschen meinen Dank aussprechen, die mich während dieser Arbeit hilfreich begleitet haben.

Zuerst möchte ich mich für die Betreuung und Unterstützung dieser Arbeit bei meinem Doktorvater Herrn Professor Dr.-Ing. Oliver Langefeld bedanken. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. Mathias Bauer danke ich für die Übernahme des Co-Referats und die hilfreichen Anregungen bei der Erstellung dieser Arbeit.

Die Projekte zur Verbesserung der technischen Staubbekämpfung im Steinkohlenbergbau wurden durch die RAG Deutsche Steinkohle AG gefördert und für ihre Unterstützung und fachlichen Anregungen möchte ich mich bei Herrn Jörg Pötsch, Herrn Frank Südhofer und Herrn Klaus Laschke bedanken.

Weiterhin danke ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts für Bergbau. Für ihre moralische Unterstützung und inspirierende Diskussionen gilt mein Dank Frau Elisabeth Clausen, Herrn Jaroslaw Wiechecki, Herrn Heiner Berger, Frau Niusha Jarrah, Herrn Amit Agasty und Herrn Moritz Kellner. Insbesondere für die unermüdliche Unterstützung bei dem Umbau der Prüfeinrichtung sowie der Durchführung von Versuchen gilt mein besonderer Dank Herrn Wolfgang Kierig, Herrn Wolfgang Fischer, Frau Kathrin Mai, Herrn Jens Grupe und Herrn Wolfgang Exner so wie meinen wissenschaftlichen Hilfskräften Herrn Patrick Martin und Herrn Kay-Uwe Hoffmann.

Abschließend möchte ich mich noch bei meiner Familie und Freunden für deren Unterstützung und Motivation bedanken. Insbesondere danke ich Frau Vanessa Bacher für ihre Unterstützung bei der schriftlichen Anfertigung und Frau Dr. Claudia Swanson für ihre unendliche Geduld und ständige Motivation zum Gelingen dieser Arbeit.

Clausthal, Dezember 2011



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>V</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Staub und seine Folgen</b>	<b>3</b>
2.1 Grundlagen des Staubes . . . . .	3
2.2 Medizinische Grundlagen . . . . .	3
2.2.1 Selbstreinigungsmechanismen . . . . .	3
2.2.2 Krankheitsbild . . . . .	4
2.2.3 Staubfraktionen . . . . .	4
2.3 Gesetzgebung . . . . .	7
2.3.1 ABergV . . . . .	7
2.3.2 BVOST . . . . .	7
2.3.3 GesBergV . . . . .	7
<b>3 Technische Staubbekämpfung</b>	<b>15</b>
3.1 Minimierung der Stauberzeugung . . . . .	15
3.1.1 Gewinnung . . . . .	16
3.1.2 Schildausbau . . . . .	20
3.1.3 Brecher . . . . .	21
3.1.4 Übergaben . . . . .	23
3.2 Reduzierung des Schwebstaubs . . . . .	24
3.2.1 Vorbelastung der Wetter . . . . .	24
3.2.2 Wettertechnik . . . . .	24
3.2.3 Bedüsung . . . . .	27

---

3.3	Organisatorische Maßnahmen . . . . .	27
3.3.1	Staubmesspläne . . . . .	28
3.3.2	Arbeitseinsatzlenkung . . . . .	28
3.3.3	Automatisierung . . . . .	28
3.4	Entwicklungspotential . . . . .	28
<b>4</b>	<b>Grundlagen der Düsentechnik</b>	<b>31</b>
4.1	Einstoffdüsen . . . . .	32
4.2	Zweistoffdüsen . . . . .	38
4.3	Zerstäubungsmechanismus . . . . .	40
4.3.1	Abtropfen . . . . .	40
4.3.2	Flüssigkeitsstrahlzerfall . . . . .	40
4.3.3	Lamellenzerfall . . . . .	43
4.3.4	Bildung des Sprühbildes . . . . .	44
4.4	Eigenschaften von Düsen . . . . .	46
4.4.1	Sprühwinkel . . . . .	46
4.4.2	Effektive Spritzbreite . . . . .	47
4.4.3	Tropfengeschwindigkeit . . . . .	47
4.4.4	Aufprallkraft . . . . .	49
4.4.5	Tropfengröße . . . . .	49
4.5	Anforderungen an das Bedüsungssystem . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Prüfstand</b>	<b>55</b>
5.1	Technische Ausstattung . . . . .	57
5.1.1	Lüfter . . . . .	57
5.1.2	Heizregister . . . . .	58
5.1.3	Staubaufgabe . . . . .	58
5.1.4	Bedüsungsvorrichtung . . . . .	60
5.2	Messtechnik . . . . .	61
5.2.1	Klima . . . . .	61
5.2.2	Staub . . . . .	61
5.2.3	Bedüsung . . . . .	66
5.2.4	Datenverwaltung . . . . .	66

---

<b>6</b>	<b>Entwicklung der Düsentechnik</b>	<b>69</b>
6.1	Einflussfaktoren . . . . .	69
6.2	Tropfendurchmesser . . . . .	70
6.3	Staubniederschlagung . . . . .	75
6.3.1	Versuchsdurchführung . . . . .	77
6.3.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	77
6.4	Driftverhalten . . . . .	80
6.4.1	Versuchsdurchführung . . . . .	80
6.4.2	Ergebnisse und Diskussion . . . . .	80
<b>7</b>	<b>Analyse der einzelnen Staubquellen</b>	<b>85</b>
7.1	Gewinnungsfeld . . . . .	85
7.1.1	Einflussbedingungen . . . . .	86
7.1.2	Erforderliche Düseneigenschaften . . . . .	86
7.1.3	Istzustand . . . . .	87
7.1.4	Sollzustand . . . . .	98
7.1.5	Auswertung der Optimierung . . . . .	109
7.2	Heckraum . . . . .	110
7.2.1	Istzustand . . . . .	110
7.2.2	Sollzustand . . . . .	114
7.3	Brecher . . . . .	115
7.3.1	Istzustand . . . . .	115
7.3.2	Sollzustand . . . . .	118
7.4	Übergaben . . . . .	121
7.5	Förderung . . . . .	121
7.6	Wasserbilanz . . . . .	122
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>125</b>
<b>9</b>	<b>Ausblick</b>	<b>129</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>131</b>



# Abbildungsverzeichnis

2.1	Staubfraktionen und ihre Eindringtiefen in die menschlichen Atemwege. . . . .	5
2.2	Konventionen definierter Staubfraktionen. . . . .	6
3.1	Meißelbedüsung am Walzenlader. . . . .	17
3.2	Nomogramm für die Hobelgassenbedüsung. . . . .	19
3.3	Nomogramm für die Kappendachbefeuchtung. . . . .	21
3.4	Wettertuch am Alten Mann. . . . .	25
3.5	Wettertuch am Strebstreckenübergang. . . . .	25
3.6	Shearer Clearer. . . . .	26
4.1	Schematische Darstellung einer einfachen Turbulenzdüse. . . . .	32
4.2	Schematische Darstellung einer Vollstrahldüse. . . . .	33
4.3	Axial-Vollkegeldüse. . . . .	34
4.4	Tangential-Vollkegeldüse. . . . .	34
4.5	Axial-Hohlkegeldüse. . . . .	35
4.6	Excenter-Hohlkegeldüse. . . . .	36
4.7	Flachstrahldüse. . . . .	37
4.8	Pneumatik-Zerstäuberdüse. . . . .	38
4.9	Abtropfen. . . . .	41
4.10	Zerwellen a) axialsymmetrische Wellen, b) asymmetrische Wellen, c) aerodynamische Kräfte. . . . .	42
4.11	Lamellenzerfall a) Randkontraktion, b) aerodynamische Wellenbildung, c)turbulenter Zerfall. . . . .	43
4.12	Zerstäuben eines Fluids. . . . .	44
4.13	Darstellung unterschiedlicher Düsen mit ihren Sprühflächen. . . . .	45
4.14	Sprühwinkel. . . . .	47

4.15	Effektive Spritzbreite. . . . .	48
4.16	Partikelgrößenanalyse. . . . .	52
4.17	Faktoren bei der Staubbekämpfung. . . . .	53
5.1	Windkanal mit Messpunkten. . . . .	55
5.2	Windkanal. . . . .	56
5.3	Lüfterkennlinie. . . . .	57
5.4	Staubaufgabe mit Schneckendosierer und Drucklufterjektor. . . . .	59
5.5	Verhältnis zwischen Staubmenge und Drehzahl des Schneckendosierers. . . . .	59
5.6	Partikelgrößenverteilung des Schieferstaubs. . . . .	60
5.7	Schematische Darstellung des MPG II. . . . .	63
5.8	Messkammer TM digital $\mu$ P. . . . .	64
5.9	PARTIMEX Staubmessstelle. . . . .	66
5.10	Regulierung des Wasserstroms. . . . .	67
6.1	Schematische Darstellung eines Laserbeugungsgerätes . . . . .	70
6.2	Multielementdetektor. . . . .	71
6.3	Streuung von Licht: Reflektierung (A), Brechung (B), Brechung und interne Reflektierung (C), und Beugung (D). . . . .	72
6.4	Integration der Tropfengrößenanalyse im Windkanal. . . . .	73
6.5	Korrekturfaktor für den Sauterdurchmesser. . . . .	74
6.6	Staubumströmung eines Tropfens. . . . .	75
6.7	Absolutes Staubbindevermögen bezogen auf den Sauterdurchmesser. . . . .	78
6.8	Staubbindevermögen bezogen auf den Sauterdurchmesser auf den Volumenstrom normiert. . . . .	79
6.9	Lambert-Beer'sche Gesetz. . . . .	82
7.1	Gewinnungsfeldbedüsung. . . . .	85
7.2	Tropfengrößenanalyse der 5L VKS-Düse. . . . .	90
7.3	Sprühbild der 5L VKS-Düse. . . . .	92
7.4	Sprühbild der 5L VKS-Düse. . . . .	93
7.5	Driftverhalten der 5L VKS-Düse. . . . .	94



7.6	Driftverhalten der 5L VKS-Düse 40 cm versetzt. . . . .	95
7.7	Verschiebung des Sprühbilds der 5L VKS-Düse. . . . .	97
7.8	Tropfengrößenanalyse der 6L FS-Düse. . . . .	100
7.9	Sprühbild der 6L FS-Düse. . . . .	101
7.10	Sprühbild der 6L FS-Düse. . . . .	102
7.11	Driftverhalten mit paralleler Anordnung der FS-Düse. . . . .	103
7.12	Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt. . . . .	105
7.13	Driftverhalten mit 45° Anordnung der 6L FS-Düse. . . . .	106
7.14	Driftverhalten mit 45° Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwet- terseitig versetzt. . . . .	108
7.15	Tropfengrößenanalyse 2,5L VKS-Düse. . . . .	112
7.16	Tropfengrößenanalyse 2,5L FS-Düse. . . . .	116
7.17	Sprühbild der 2,5L FS-Düse bei 5 bar. . . . .	117
7.18	Sprühbild der FM31-Düse bei 10 bar. . . . .	119
7.19	Sprühbild der FM31-Düse bei 10 bar. . . . .	120
7.20	Bedüsungen in der Förderung. . . . .	121



# Tabellenverzeichnis

2.1	Staubbelastungsstufen. . . . .	8
2.2	Einteilung der Eignungsgruppen. . . . .	9
2.3	Staubmessgeräte. . . . .	13
3.1	Staubquellen in 13 Streben der USA. . . . .	15
4.1	Klassifizierung der Zerstäuber. . . . .	31
4.2	Düsenkennwerte und ihre Einflussfaktoren. . . . .	46
4.3	Aufprallkraft im Abstand 30 cm von der Düse. . . . .	50
5.1	Verhältnis zwischen Lüfterdrehzahl und Wettergeschwindigkeit. . . . .	58
6.1	Staubkonzentrationen des Schieferstaubs im Windkanal bei 3 m/s. . . . .	77
6.2	Driftverhalten der Düsen bei 0, 1 und 3 m/s. . . . .	81
6.3	Driftverhalten der Düsen bei 0, 1 und 3 m/s. . . . .	83
7.1	Volumenströme der 5L VKS-Düse. . . . .	88
7.2	Theoretische Sprühbreiten der 5L VKS-Düse. . . . .	89
7.3	Tropfengrößen der 5L VKS-Düse. . . . .	90
7.4	Korrigierte Tropfengrößen der 5L VKS-Düse. . . . .	91
7.5	Driftverhalten der 5L VKS-Düse. . . . .	95
7.6	Driftverhalten der 5L VKS-Düse 40 cm versetzt. . . . .	96
7.7	Volumenstrom der 6L FS-Düse. . . . .	99
7.8	Theoretische Sprühbreiten der 6L FS-Düse. . . . .	99
7.9	Tropfengrößen der 6L FS-Düse. . . . .	100
7.10	Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse. . . . .	104
7.11	Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt. . . . .	105

7.12 Driftverhalten mit $45^\circ$ Anordnung der 6L FS-Düse. . . . .	107
7.13 Driftverhalten mit $45^\circ$ Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwet- terseitig versetzt. . . . .	108
7.14 Volumenstrom der 2,5L VKS-Düse. . . . .	111
7.15 Sauterdurchmesser der 2,5L VKS-Düse. . . . .	112
7.16 Beladungsabhängige Brecherbedüsung. . . . .	115
7.17 Volumenstrom der 2,5L FS-Düse. . . . .	116
7.18 Wasserbilanz vor der Optimierung. . . . .	123
7.19 Wasserbilanz nach der Optimierung. . . . .	124

# 1 Einleitung

Die technische Staubbekämpfung ist einer der wichtigsten Bereiche des Arbeits- und Gesundheitsschutzes bei dem untertägigen Abbau von Steinkohle. Die Entwicklungen auf diesem Feld haben eine lange Geschichte, die auf der Entdeckung von Lungenerkrankungen in Zusammenhang mit Grubenstaub beruhen. Die Quarzstaublungenkrankung ist dabei einer der ältesten in der Literatur beschriebenen Berufskrankheit der Welt [71]. Um die Mitarbeiter zu schützen, sind Fortschritte bei der technischen Staubbekämpfung ständig vorangetrieben worden. Dies war stets mit gesetzlichen Vorschriften gekoppelt, welche die Staubexposition von Personen regeln sollten.

Bei der technischen Staubbekämpfung gilt der Grundsatz, den Staub primär an seiner Entstehung zu verhindern und nur sekundär aus der Luft niederzuschlagen. Durch viele technologischen Fortschritte ist dieser Ansatz als treibende Kraft genutzt worden, um die Staubbekämpfung weiter voranzutreiben. Eine Betrachtung der Staubentstehungsorte und die damit verbundene Maschinentechnik unter gleichzeitiger Messung der Staubkonzentrationen zeigt deutlich, an welchen Stellen eine Verbesserung nötig wird. Dabei sind im letzten Jahrhundert große Weiterentwicklungen im Bereich der Berg- und Maschinentechnik erfolgt. Eine der größten Staubquellen stellt das Gewinnungsgerät dar, da hiermit die Steinkohle aus dem Gebirgsverband gelöst wird. Hier können Verbesserungen an den Gewinnungsmaschinen wie beispielsweise Verbesserung des Schneidvorganges, Veränderungen an den Meißelformen und -werkstoffen sowie die Optimierung des Schneidvorganges in Bezug auf Schnittgeschwindigkeiten und -tiefen ausgeführt werden. Zusätzlich zur Gewinnung gehören der Schreitausbau und die Förderung zu den signifikanten Staubquellen. Alleine durch die Veränderung des Schreitvorganges konnten erhebliche Verbesserungen bei dem Lösen des Materials an der Kappe beim Rücken festgestellt werden. Dabei spielen Bedüsungssysteme eine wichtige Rolle.

Zusätzlich zu den maschinentechnischen Maßnahmen ist in vielen Fällen die Bedüsung mit Wasser unabdingbar für ein effektives Gesamtsystem bei der Staubbekämpfung. In erster Linie erfüllt das Befeuchten von Materialoberflächen und der Bergepolster die Aufgabe der Benetzung, welche dazu führt, dass bereits gebundene Staubpartikel nicht in die Schwebe geraten. Weiterhin verhindert das Befeuchten, dass Flächen oder Gesteinsstücke bzw. Kohlenstücke beim Zerschlagen Staub freisetzen können. Zum zweiten können Bedüsungssysteme die viel schwierigere Aufgabe der Niederschlagung von Schwebestäuben aus der Luft erfüllen.

Die Entwicklungen in der Bedüsungstechnik sind meist auf Erfahrungen im Betrieb zurückzuführen, bei der sich gewisse Düsen als geeignet oder besser als andere herausgestellt haben. Eine genaue Betrachtung des Sprühstrahls und der Wechselwirkungen zwischen Tropfen und Umgebungsbedingungen ist bis heute nicht ausführlich erfolgt. Für eine optimale Anpassung der Bedüsung muss diese mit der angewendeten Maschinentechnik, den vorherrschenden Wetterbedingungen und weiteren Einflussfaktoren abgestimmt werden.

Ziel dieser Arbeit ist eine Begutachtung der bereits verwendeten Düsen mit einer Analyse ihrer Eigenschaften, Aufgabe bei der Staubbekämpfung und der dazugehörigen Effektivität, sowie auftretenden Schwächen, um dadurch zu ermitteln, welche Düseigenschaften für diese bestimmte Staubbekämpfungsmaßnahme nötig sind, um die Aufgabenstellung optimal zu erfüllen. Das Ergebnis ist der Einsatz von Düsen, welche an die Betriebs- und Umgebungsbedingungen am Staubentstehungsort optimal angepasst sind. Dadurch kann gesichert werden, dass durch diese Bedüsungssysteme ein gesünderes Arbeitsklima für die Mitarbeiter geschaffen werden kann und zusätzlich durch den effizienteren Einsatz des Betriebsmittels Wasser noch weitere positive Auswirkungen zu erwarten sind. Auch in Zukunft wird die Bedeutung der Staubbekämpfung nicht abnehmen. Dies gilt vor allem bei den Entwicklungen zu Hochleistungsbetrieben und den immer strenger werdenden Vorschriften.

## **2 Staub und seine Folgen**

### **2.1 Grundlagen des Staubes**

Stäube sind in der Luft getragene, feinste, feste Partikel, die durch mechanische Prozesse oder durch Aufwirbelungen entstehen. Zu den Hauptstaubquellen im Steinkohlenbergbau unter Tage gehören die Gewinnung, das Rücken des Ausbaus, die Zerkleinerung, und die Förderung der Rohstoffe sowie die Streckenauffahrung und das Senken bei der Infrastruktur. Je nach Korngröße verbleiben diese Partikel unterschiedlich lange in der Luft. Durch das Einatmen können sich diese feinen Staubpartikel im Alveolarbereich der Lunge absetzen und zu einer Erkrankung der Mitarbeiter führen.

### **2.2 Medizinische Grundlagen**

Die Silikose bzw. Quarzstaublungenenerkrankung stellt die wohl älteste Berufskrankheit dar. Paracelsus berichtete bereits im 16. Jahrhundert von der Bergsucht und anderen Bergkrankheiten [69]. In der deutschen Berufskrankheiten-Verordnung ist die Silikose seit 1929 aufgeführt. So kam es in den Nachkriegsjahren zu einem Anstieg bei den Diagnosen von erstmals entschädigungspflichtigen Silikosen mit dem Erreichen eines Spitzenwertes von über 8500 Personen im Jahr 1953 [14]. Diese enorme Gefahr führt dazu, dass der Staubbekämpfung eine signifikante Rolle zugewiesen wurde und auch die medizinischen Grundlagen für die Entstehung der Staublungenkrankheiten detailliert untersucht wurden.

#### **2.2.1 Selbstreinigungsmechanismen**

Jeder Staub führt zu einer Belastung der Atemwege, worauf der Körper seine natürlichen Schutzmechanismen aktiviert. Durch das Husten und Niesen können Fremdkörper zum Teil aus dem Körper entfernt werden. Die Lunge selbst hat

mehrere Möglichkeiten Materialien zu entfernen. Partikel, die sich an dem Bronchialschleim in den konduktiven Atemwegen ablagern, werden durch den mukoziliäre Clearance, den Abtransport der Fremdpartikel in Richtung Rachen durch die Flimmerhärchen und das Verschlucken oder Aushusten beseitigt. Unlösliche Partikel in den unzilierten Bereichen der Alveolen werden von Makrophagen oder Fresszellen umschlungen und über lange Zeit abgebaut. Die Verweilzeit kann Monate bis Jahre dauern. Lösliche Materialien können durch lymphogene Wege in den Blutstrom geleitet werden.[70]

### 2.2.2 Krankheitsbild

Die Aussetzung höherer Staubkonzentrationen über längere Zeiträume führt zu einer Überlastung des Selbstreinigungsmechanismus, und damit zu der Bildung von Lungenerkrankungen. Im Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 4101 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung wird erläutert, dass die Silikose (Quarzstaublungenerkrankung) durch die Einwirkung alveolengängiger Staubpartikel entsteht, die Quarz, Cristobalit oder Tridymit enthalten. Kohlengrubenstäube sind quarzarme Mischstäube, bei denen die Begleitstäube die Gewebsreaktionen im Wesentlichen mitprägen. Die ummantelten silikotischen Kerne weisen einen breiten Saum von Staubphagozyten auf. Dadurch kann die Konfluierung solcher Knoten entstehen, die dann zu Ballungen und zu einem ausgedehnten Narbengewebe führen, welche Auswirkungen auf die Lungenfunktion haben. Sie führen zu Störungen des Gasaustausches und wegen Einengungen im Lungenkreislauf zu einer Überlastung des Herzens. Die Diagnose für den Nachweis einer Veränderung in der Lunge ist nur mittels einer Röntgenaufnahme möglich. Beim Fortschreiten der Silikose nimmt die Leistungsfähigkeit ab und Atemstörungen nehmen zu. Dies führt später zu Atemnot, Husten, Auswurf und Brustschmerzen. [4]

### 2.2.3 Staubfraktionen

Ausschlaggebend für die Erkrankung an der Silikose ist das Ablagern der Stäube in der Lunge. Der Staub wird inhaliert, woraufhin sich dieser dann in den Alveolen sammelt. In der Grubenluft relevanter Staub wird Schwebstaub genannt und ist nach DIN EN 481 als "alle von der Luft umgebenen Partikel inner-



halb eines bestimmten Luftvolumens" definiert [6]. Wie diese Schwebstoffe über den Atemtrakt in den menschlichen Körper gelangen, ist von den Partikeln, der Geschwindigkeit und der Richtung in der Luft sowie vom Einatemprozess abhängig. Eine mögliche Ablagerung bei der jeweiligen Eindringtiefe wird stark durch die Größe der Partikel bestimmt. Die Staubfraktionen werden, wie in Abbildung 2.1 dargestellt, unterschieden [6]. Die einatembare Fraktion, auch

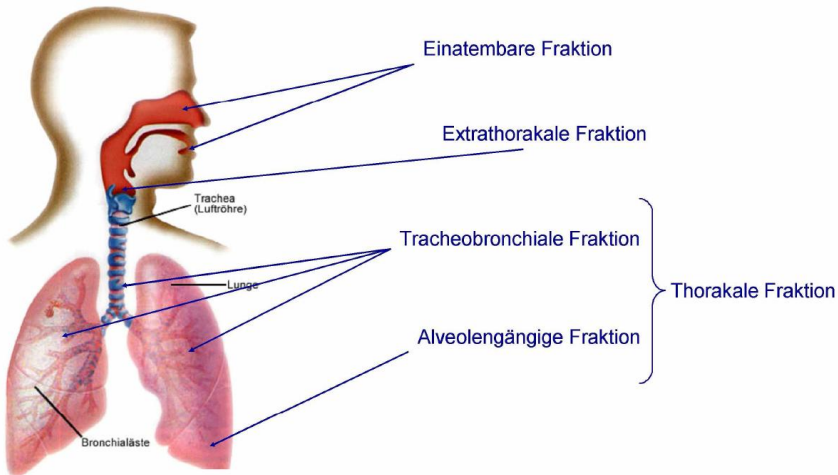


Abbildung 2.1: Staubfraktionen und ihre Eindringtiefen in die menschlichen Atemwege [19].

E-Staub genannt, ist der Massenteil aller Schwebstoffe, der durch die Nase oder den Mund eingeatmet werden kann. Der Anteil an eingeatmeten Partikeln, die nur bis zum Kehlkopf eindringen und nicht weiter in die Atemwege gelangen, wird als extrathorakale Fraktion bezeichnet. Partikel, die über den Kehlkopf hinaus vordringen, gehören zur thorakalen Fraktion. Dieser unterteilt sich in die tracheobronchiale und alveolengängige Fraktion. Die tracheobronchiale Staubfraktion beschreibt den Massenanteil der eingeatmeten Partikel, der über den Kehlkopf hinaus aber nicht bis in die nichtcilierten Luftwege gelangt. Der A-Staub, alveolengängige Fraktion, stellt die Partikel dar, die bis in die nichtcilierten Luftwege vordringen können.

Diese Staubfraktionen werden nach ihrer Partikelgröße und der respektiven Wahrscheinlichkeit der Eindringung in der DIN EN 481 klassifiziert. Aus Abbil-

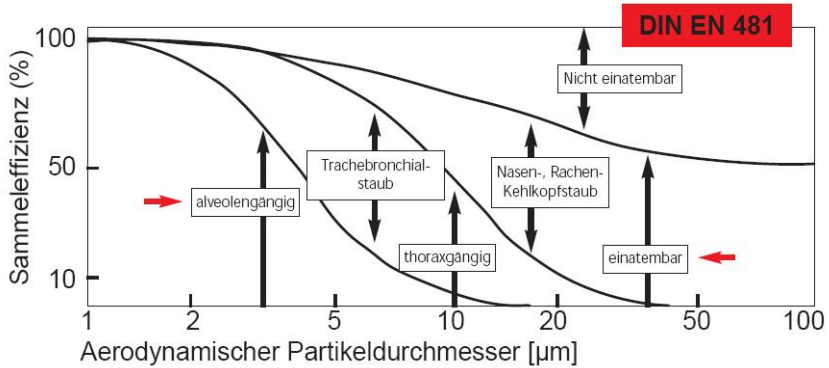


Abbildung 2.2: Konventionen definierter Staubfraktionen [37].

Abbildung 2.2 wird ersichtlich, dass 50 % der Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von 100 μm in der Regel eingeatmet werden können. Zu der thorakalen Fraktion gehören 50 % der 10 μm großen Partikel. Bei dem A-Staub werden nur 50 % der Partikel, die 4 μm groß sind, in die Alveolen gelangen. In Anlehnung an diese Eindringtiefen und Ablagerungspotenziale werden die Gesetze zum Arbeits- und Gesundheitsschutz aufgestellt.

## **2.3 Gesetzgebung**

### **2.3.1 ABergV**

Die Allgemeine Bundesbergverordnung (ABergV) regelt die Sicherheit und den Gesundheitsschutz für alle bergbautechnischen Unternehmen [7]. Sie stellt die allgemeinen Pflichten und Anforderungen in Bezug auf verantwortliche Personen, Unterweisungen, Sicherheits- und Gesundheitsschutzdokumente und untertägige Arbeitsstätten dar.

### **2.3.2 BVOSt**

Die Bergverordnung für die Steinkohlenbergwerke (BVOSt) enthält alle Bestimmungen für die Gruben- und Tagesbetriebe im Land Nordrhein-Westfalen [8]. Hier werden in dem Abschnitt zum Arbeitsschutz die Bestimmungen für das Anzeigen von Staubmessgeräten sowie die Ausbildung von Staubbeauftragten geregelt.

### **2.3.3 GesBergV**

Die Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (GesBergV, Gesundheitsschutz-Bergverordnung) vom 31.07.1991 bietet die aktuelle Rechtslage für alle Bergbaubetriebe [5]. Sie befasst sich mit den arbeitsmedizinischen Vorsorgeuntersuchungen, dem Umgang mit Gefahrstoffen einschließlich fibrogener Grubenstäube und dem Schutz vor anderen gesundheitlichen Schäden. Die GesBergV beinhaltet besondere Bestimmungen für den untertägigen Steinkohlenbergbau.

### **Persönliche Belastung**

Die persönliche Belastung durch fibrogene Grubenstäube muss für jeden Beschäftigten in untertägigen Betrieben für einen Beurteilungszeitraum von zwei Jahren ermittelt werden. Die persönlichen Staubbelastungswerte werden nach Anlage 6 der GesBergV ermittelt. Die Berechnung des persönlichen Staubbelastungswerts (Expositionswert) wird je nach Massenanteil an quarzhaltigem Feinstaub

bzw. Quarzfeinstaub mit der entsprechenden Formel berechnet. Der Staubbelastungswert, der die Expositionsdauer und die Staubkonzentration beinhaltet, stellt somit die Kennzahl über die persönliche Staubbelastung eines Mitarbeiters dar. Da Expositionswerte dimensionslos sind, können sie addiert werden.

Expositionswert bei quarzhaltigem Feinstaub ( $\leq 5/k$  Massen-% Quarzanteil)

$$E_c = f_c * S \quad (2.1)$$

Expositionswert bei Quarzfeinstaub ( $> 5/k$  Massen-% Quarzanteil)

$$E_{cq} = k * f_{cq} * S \quad (2.2)$$

Erläuterung:

- $f_c$  = Belastungsfaktor für quarzhaltigen Feinstaub
- $f_{cq}$  = Belastungsfaktor für Quarzfeinstaub
- $S$  = Anzahl der verfahrenen Arbeitsschichten
- $k$  = Faktor für den Flözhorizont

Der Staubbelastungswert bezieht sich auf die durchschnittliche Belastung eines Beschäftigten bei dem Einsatz an einem Arbeitsplatz mit der Staubstufe 1. Die einzelnen Betriebspunkte werden Staubbelastungsstufen nach den Staubkonzentrationswerten zugeordnet, siehe Tabelle 2.1. Die Beschäftigten werden in

Tabelle 2.1: Staubbelastungsstufen.

<b>Staubbelastungs- stufe</b>	<b>Quarzhaltiger Feinstaub <math>c_1</math> in <math>\text{mg}/\text{m}^3</math></b>	<b>Quarzfeinstaub <math>c_{q1}</math> in <math>\text{mg}/\text{m}^3</math> bei <math>k = 1</math></b>
0	<2,0	<0,1
1	>2,0-4,0	>0,1-0,2
2	>4,0-6,0	>0,2-0,3
3	>6,0-8,0	>0,3-0,4

unterschiedliche Eignungsgruppen aufgeteilt, siehe Tabelle 2.2. Beschäftigte in

den Eignungsgruppen 1.1 bis 1.3 dürfen einen persönlichen Staubbelastungswert von 440 in einem Zeitraum von 2 Jahren nicht überschreiten. Ein Staubbelastungsgrenzwert von 330 gilt für alle Beschäftigten der Gruppen 2.11 und 2.12 sowie für alle Beschäftigten unter 21 Jahren. Beschäftigte ab der Eignungsgruppe 2.21 dürfen nicht unter Tage eingesetzt werden, wobei zum Teil besondere Beschäftigungsbeschränkungen gelten. Um die persönliche Belastung zu ermitteln, müssen regelmäßige Messungen unter Tage durchgeführt werden.

Tabelle 2.2: Einteilung der Eignungsgruppen.

1	Keine gesundheitlichen Bedenken
1.1	Personen ohne Staublungenveränderungen oder andere ihre Beschäftigung in pneumokoniosegefährdeten Betriebspunkten beeinträchtigende Körperschäden
1.2	Personen mit sogenannter unspezifischer Lungenzeichnungsvermehrung
1.3	Personen mit fraglichen Staublungenveränderungen
2	Keine gesundheitlichen Bedenken unter bestimmten Voraussetzungen
2.11	Personen mit röntgenologisch sicheren, aber noch nicht mittelgradigen Staublungenveränderungen ohne wesentliche Funktionsstörungen
2.12	Personen mit anderen, ihrer Beschäftigung in pneumokoniosegefährdeten Betriebspunkten entsprechend Nummer 2.11, beeinträchtigenden Körperschäden
2.21	Frühsilikotiker
2.22	Personen mit Staublungenveränderungen, die ein rasches Fortschreiten zeigen
2.23	Personen mit röntgenologisch sicheren, aber noch nicht mittelgradigen Staublungenveränderungen und mit wesentlichen Funktionsstörungen
2.24	Personen mit mittelgradigen bis fortgeschrittenen Staublungenveränderungen ohne wesentliche Funktionsstörungen
2.25	Personen mit mittelgradigen bis fortgeschrittenen Staublungenveränderungen und mit wesentlichen Funktionsstörungen
3	Befristete gesundheitliche Bedenken (für eine Beschäftigung in pneumokoniosegefährdeten Betriebspunkten)
4	Dauernde gesundheitliche Bedenken

## **Staubmessung**

An allen Betriebspunkten müssen regelmäßige, arbeitsschichtbezogene Staubmessungen erfolgen. Dabei müssen, bezogen auf dem Betriebspunkt und Messung, alle relevanten Daten mit aufgenommen werden. An neuen Betriebspunkten muss innerhalb der ersten Betriebswoche die erste Staubmessung zur Einstufung stattfinden. Danach sind Wiederholungsmessungen gemäß Anlage 8 GesBergV durchzuführen.

Die Messungen müssen in Gewinnungsbetrieben und den zugehörigen Abwetterstrecken während der Gewinnung in monatlichen Abständen wiederholt werden. Ebenso haben sie bei maschinellm Vortrieb in Strecken, Auf- und Abhauen und in Raubbetrieben zu erfolgen. Gleiches gilt für alle anderen Betriebspunkte, die mit einer Staubbelastungsstufe  $>1$  eingestuft sind.

In vierteljährlichen Abständen haben die Messungen in Wetterzuführungsstrecken von Gewinnungsbetrieben mit gegenlaufender Bewetterung während der Kohlegewinnung zu erfolgen. Gleiches gilt für die Gewinnungsbetriebe sowie deren zugehörigen Abbaustrecken außerhalb der Kohlegewinnung, in sonderbewetterten Vortrieben und Abteufbetrieben und in allen Betriebspunkten, die eine Staubbelastungsstufe von 1 vorweisen. In Betriebspunkten, die in der Staubbelastungsstufe 0 eingestuft sind, ausgenommen die oben genannten Punkte, werden halbjährlich Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Wenn der Unternehmer halbjährlich Wiederholungsmessungen durchgeführt hat und nachweisen kann, dass die Staubsituation aufgrund betrieblicher Rahmenbedingungen unverändert geblieben ist, so ist nur noch eine dreijährige Messung für Betriebspunkte durchzuführen. Eine Wiederholungsmessung hat unverzüglich, jedoch längstens innerhalb von sieben Arbeitstagen nach Bekanntwerden des Messergebnisses, zu erfolgen, wenn die Betriebspunkte in der höchstzulässigen Staubbelastungsstufe eingestuft sind. Ebenfalls hat die Messung in diesem Zeitabschnitt zu erfolgen, wenn es zu wesentlichen Änderungen der geologischen oder betrieblichen Verhältnisse kommt oder wenn Staubbekämpfungsmaßnahmen stattgefunden haben.

## **Staubmessgeräte**

Die Messungen dienen zur Bestimmung von Staubmengen je Volumeneinheit der Trägerluft und somit zur Bestimmung der Staubkonzentration. Gravimetrische Staubmessungen werden mit dem Ziel der Bestimmung von Massenkonzentrationen des Feinstaubes sowie zur Ermittlung der Konzentration des Quarzfeinstaubes durchgeführt. Das Prinzip der Messung des A-Staubes basiert bei dem gravimetrischen Verfahren auf dem Sammeln der alveolengängigen Staubfraktionen. Als Beispiele für gravimetrische Messgeräte sind TBF 50, MPG II und CIP 10 zu nennen, die im deutschen Steinkohlenbergbau eingesetzt werden bzw. wurden [21].

Bei dem tyndallometrischen Messverfahren wird die alveolengängige Staubfraktion gemessen. Dies geschieht durch die Messung des Streulichtes, das bei unterschiedlichen A-Staub-Konzentrationen eine unterschiedliche Intensität aufweist. Die gemessene Lichtintensität ist bei diesem Verfahren das Maß für die Staubkonzentration in der Messkammer. Verantwortlich für die Messung der Streulichtausbeute sind die Größe der Staubteilchen und der Winkel zwischen der Einstrahlungsrichtung des Primärlichtes und der Messung des Streulichtes. Die Angleichung der Streulichtausbeutekurve an die Despositionscurve wird erreicht, indem ein Streuwinkel von  $70^\circ$  verwendet wird. Weiterhin wird zur Angleichung monochromatisches Licht, im nahen Ultrarotbereich, statt weißem Licht, verwendet. Unter diesen Bedingungen verhält sich das Streulichtsignal proportional zu dem Volumen des in den Alveolen deponierten Staubes. Somit entfällt die Vorabscheidung gröberer Staubteilchen. Mit dem tyndallometrischen Messverfahren ist es möglich, Einzel- und Mittelwerte zu erzeugen, die sofort vorliegen und ausgewertet werden können. Sie dienen für eine zusätzliche, kontinuierliche Erfassung von Staubbelastungen. Durch die Direktanzeige ist es möglich, Staubquellen besser und schneller zu erfassen. Das TM data Gerät ist in der Lage, diese Messwerte abzuspeichern, um sie später auf einen Computer übertragen zu können. Als Nachteil dieses Verfahrens können Störungen bei den Messungen auftreten, die durch Rauch und Wasserdampf hervorgerufen werden. Weiterhin ist es nicht möglich, eine Staubanlyse durchzuführen. Auch sind diese Geräte nicht dazu geeignet, den Quarzanteil im A-Staub zu bestimmen, sie geben lediglich die Gesamtfinstaubkonzentration an. Messgeräte, die in diesem

Verfahren Anwendung finden, sind beispielsweise das TM-digital  $\mu$ P oder das TM data sowie das PARTIMEX.

In der Sammelliste "Einrichtungen und Verfahren zur Staubbekämpfung sowie Staubmeßgerät" der Bezirksregierung Arnsberg sind zehn zugelassene Staubmessgeräte dokumentiert. Das, in Tabelle 2.3 unter Punkt 10, genannte Partikelmessgerät unterliegt der Einschränkung, dass die gewonnenen Messergebnisse nicht zur Einstufung von Betriebspunkten herangezogen werden dürfen. Die Tyndalloskope T II und T III finden heutzutage keine Anwendung mehr.



Tabelle 2.3: Staubmessgeräte.

Nr	Gerät	Typ	Hersteller	Datum d. Zulassung
1	Tyndalloskop	T II	Optische Werke; Ernst Leitz GmbH, Wetzlar	14.06.1955
2	Tyndalloskop	T III	Optische Werke; Ernst Leitz GmbH, Wetzlar	20.05.1959
3	Staubmess- und Probenahme-gerät (MPG II)	SFI Bauart Wazau	Dr.-Ing. Georg Wazau, Berlin	05.11.1973
4	grav. Staubprobenahmegerät	TBF 50c	Mollidor u. Müller, Rodenkirchen	20.06.1975
5	Feinstaub-Streulicht-Photometer mit Batteriestromversorgung und Streulichteinrichtung	TM-digital SE 1511 RE101	Ernst Leitz, Wetzlar Bergbau-Forschung GmbH	19.09.1978
6	Staubmessgerät; Feinstaub-Streulicht-Photometer	TM-digital $\mu p$	Helmut Hund GmbH, Wetzlar	20.12.1985
7	Feinstaubmessgerät	FMA-TMS 1	Helmut Hund GmbH, Wetzlar	18.05.1990
8	Feinstaub-Streulicht-Photometer	TM data	Helmut Hund GmbH, Wetzlar	13.08.1990
9	Staubmessgerät für personenbezogene Staubmessungen	CIP 10	Firma MSA, F-Cergy-Pontoise	02.10.1992
10	Partikelmessgerät	PARTIMEX	Fa. Kirchgässer Industrie-elektronik GmbH, Ratingen	12.02.2003



## 3 Technische Staubbekämpfung

Die technische Staubbekämpfung befasst sich mit zwei Aufgaben, die Minimierung der Stauberzeugung und die Reduzierung des Schwebstaubs aus der Luft. Zwecks dieser Aufgabe können die Maschinenteknik, die Wettertechnik, die Bedüsungssysteme, die Wasseradditive, die Staubkollektoren und die technische Anwendungen betrachtet werden. Hinzu kommen Arbeitsrichtlinien, die durch organisatorische Maßnahmen die persönliche Staubexposition regeln. Klar ist, wenn weniger Staub produziert wird, muss auch weniger Staub aus der Luft entfernt werden [56].

### 3.1 Minimierung der Stauberzeugung

Bei der Minimierung der Stauberzeugung werden in erster Linie die Arbeitsprozesse betrachtet bei denen Staub entsteht, wozu die Gewinnung, das Bohren, das Sprengen, das Fallen, das Brechen und die Förderung gehören. Die Einflussgrößen der mechanischen Prozesse können dann betrachtet werden und Anpassungen umgesetzt werden. Hinzu kommen Vorsorgemaßnahmen für die Befeuchtung vom Gut vor dem Einsatz der Maschinen. Bei der Gewinnung von Steinkohle im Streb gehören das Gewinnungsgerät, der Schildausbau, der Brecher und die Wetterführung zu den größten Staubquellen. Tabelle 3.1 zeigt für

Tabelle 3.1: Staubquellen in 13 Streben der USA [27].

Quelle	Anteil	Mittlere Konzentration	Verteilung der Konzentration
Frischwetter	9 %	0,33 mg/m <sup>3</sup>	0,07 – 1,1 mg/m <sup>3</sup>
Übergabe/Brecher	15 %	0,78 mg/m <sup>3</sup>	0,29 – 1,3 mg/m <sup>3</sup>
Schildausbau	23 %	1,8 mg/m <sup>3</sup>	0,67 – 2,3 mg/m <sup>3</sup>
Walze	53 %	3,5 mg/m <sup>3</sup>	0,7 – 8,8 mg/m <sup>3</sup>

die Staubquellen von 13 Strebbetrieben die durchschnittlichen Staubkonzentrationswerte bei der Gewinnung von Steinkohle in den USA. Wie erwartet, wird der meiste Staub von den Gewinnungsgeräten erzeugt. Zu bemerken ist der geringe aber trotzdem bedeutende Anteil an Staub, welcher durch die Frischwetter mitgeliefert wird.

### 3.1.1 Gewinnung

Bei der langfrontartigen Gewinnung gehören das Gewinnungsgerät, Kohlenhobel oder Walzenlader, der Kettenkratzerförderer und der Schildausbau zu den mechanischen Ursachen bei der Staubentstehung. Es gab eine Vielzahl von Untersuchungen bezüglich der Kontrollparameter von Gewinnungsgeräten und ihren Einflüssen auf die Staubentwicklung. So kann eine größere Schnitttiefe, wie von Ludlow und Wilson gezeigt [61], zu größeren gelösten Kohlebrocken führen, welche wiederum zu einer geringeren Staubentwicklung pro gewonnener Tonne Kohle führt. Bei der schneidenden Kohlegewinnung wird die primäre Stauberzeugung durch den Eingriff der Meißel verursacht und eine Erhöhung der Meißel Eindringtiefe kann, durch eine Anpassung der Marschgeschwindigkeit des Walzenladers in Abhängigkeit von der Umfangsgeschwindigkeit bzw. herabgesetzten Walzendrehzahl, diese positiv beeinflussen. Durch die Form des Walzenkörpers mit ihrem Schraubengang wird das Fördergut zum Strebförderer transportiert und es kann, verursacht durch die Nachzerkleinerung des Fördergutes, zu einer sekundären Stauberzeugung kommen [18]. Die Exponential- bzw. Globoidwalzen ermöglichen eine hohe Ladearbeit bei einer geringeren Staubentwicklung. Dabei spielt nicht nur die Geometrie der Walze sondern auch die Geometrie des Meißels und seiner Hartmetallschneide eine wichtige Rolle. Dazu kommt das Verschleißverhalten der Meißelspitze. Ein schlanker Meißel verbraucht weniger Energie und produziert deutlich weniger Staub, verschleißt aber deutlich schneller als breitere Meißel. Eine mittlere Profilbreite mit größerer Hartmetallschneide ist dafür weniger verschleißanfällig und auf längere Zeit besser für die Staubentwicklung [67]. Zu den Wartungsarbeiten sollte eine regelmäßige Prüfung und ein Austausch stark verschleißter, gebrochener oder fehlender Meißel stattfinden.

Neben den Kontrollparametern der Gewinnungsgeräte spielen die dazugehörigen

Bedüsungssysteme eine entscheidende Rolle bei der Staubbekämpfung. Seit der Einführung des Walzenladers gab es verschiedene Entwicklungsstufen bei der integrierten Bedüsung. Beginnend mit der Innenbedüsung, bei der die Düsen auf den Walzengängen montiert waren, konnten eine Einhaltung der damaligen Grenzen bezüglich der Feinstaubbelastung erzielt werden. Mit der steigenden Förderleistung der Strebe und dem Mitschneiden von Nebengestein kamen diese Düsen an ihre Leistungsgrenze. Die Entwicklung eines an die Walze integrierten Bedüsungssystems mit der Verwendung von Hochdruckdüsen am Meißel führte zu einer 50 %-igen Reduzierung des Feinstaubs [14]. Aufgabe dieser Düsen



Abbildung 3.1: Meißelbedüsung am Walzenlader [12].

ist es, Wasser so nah wie möglich an den Staubentstehungsort zu liefern, um somit Wasser direkt mit der gebrochenen Kohle zu vermischen und den frisch entstandenen Staub niederzuschlagen. Als effektivste Methoden haben sich die Hochdruckwasser-Schneidspurbedüsung und die Ejektorbedüsung gezeigt [54]. Bei der Schneidspurbedüsung werden Düsen hinter dem Meißel eingebaut, wel-

che Wasser mit Hochdruck in die offenen Risse im Vorfeld des Walzenladers liefern [93]. Mit dieser Vorbefeuchtung der Risse und Klüfte kann der dort vorhandene Staub vor der Gewinnung gebunden werden. Bei der Ejektorbedüsung werden zusätzlich staubhaltige Wetter direkt am Entstehungsort angesaugt und im Mischrohr niedergeschlagen [92].

Zusätzlich zur Meißelbedüsung kann noch eine Gewinnungsfeldbedüsung bei Bedarf dazugeschaltet werden. Diese Bedüsungsart wird auch im Hobelbetrieb eingesetzt und wird dann auch Hobelgassenbedüsung genannt. Durch die elektronische Hobelgassenwegmessung und -standortbestimmung kann die Position des Hobels genau bestimmt werden. Diese Information kann wiederum verwendet werden, um elektrohydraulisch gesteuerte Ventile anzusteuern. Zuerst wurde die Steuerung dieser Ventile fest eingestellt und dazu musste der Einstellwert individuell ermittelt werden. Für die Ermittlung der erforderlichen haufwerksmengenabhängigen Wassermenge wurde ein Nomogramm, siehe Abbildung 3.2, entwickelt [13]. Aus diesem Diagramm kann für gegebene Hobelgeschwindigkeit, Schnitttiefe und Mächtigkeit die gelöste Kohlenmenge und über die erwünschte Kohlenfeuchte die benötigte Wassermenge ermittelt werden. Mit der Einführung der EDV-gesteuerten Hobelgassenbedüsung war es dann möglich, die Bedüsung an die betrieblichen Gegebenheiten anzupassen und die Anzahl der aktiven Düsengruppen vor oder hinter dem Hobel zu optimieren [14]. Diese Bedüsung soll sowohl den Kohlenstoß benetzen und den Schwebestaub niederschlagen als auch versichern, dass die Kohle im Kettenkratzerförderer ausreichend befeuchtet wird.

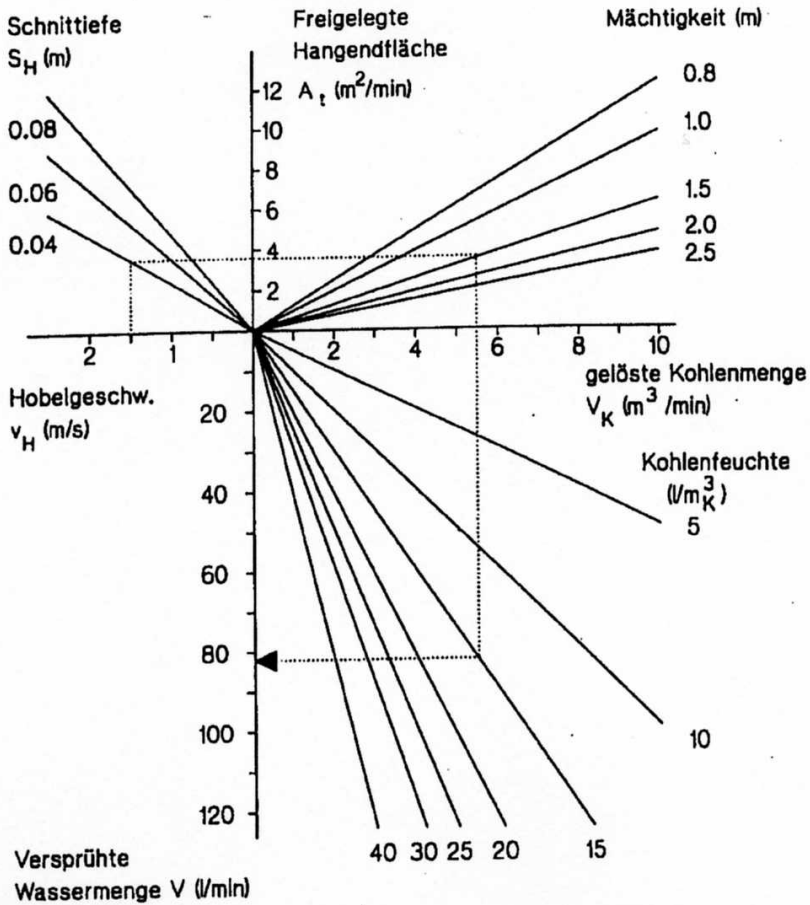


Abbildung 3.2: Nomogramm für die Hobelgassenbedüsung [13].

### 3.1.2 Schildausbau

Der Schildausbau war früher für bis zu 50 % der gesamten Feinstaubbelastung am Strebende zuständig. Durch die Bildung von Bergepolstern auf den Kappen, das Vorziehen des Ausbaus im gelöstem Zustand und das Zermahlen von Bergenstücken auf den Kappen und in den Spaltabdichtungen wurden erhebliche Feinstaubkonzentrationen erreicht [36]. Hier gab es viele Ansätze zur Lösung des Problems. Die Installation von Spaltabdichtungen unter den Schildspalten verlief bei den Prüfstandversuchen gut, scheiterte aber bei dem Betriebsversuch, da ein betriebsgerechtes Arbeiten beim Rückvorgang nicht gewährleistet werden konnte. Die Spaltabdichtungsbedüsung, obwohl wirksam bei der Staubbekämpfung, war durch das herabtropfende Wasser eine ständige Belästigung für die Belegschaft. Der große Erfolg kam mit der Einführung der Kappendachbefeuchtung und das Rücken unter Hangendkontakt. Düsen wurden direkt in der Schildkappe installiert, die dann Wasser direkt in die Bergepolstern einbringen konnten. Dadurch wurde die Wasserbelästigung minimiert. Das Schreiten unter Hangendkontakt mit einem befeuchteten Bergepolster ermöglichte eine Reduzierung der Feinstaubbelastung von bis zu 80 %. Die Steuerung der Kappendachbefeuchtung muss den Betriebsbedingungen in Bezug auf die Bergepolster und die benötigte Wassermenge zur Befeuchtung ohne die Erzeugung von Tropfwasser angepasst werden. Hierzu wurde ein Nomogramm, siehe Abbildung 3.3, zur Bestimmung der Bedüsungsdauer erstellt [42]. Um die Bedüsungsdauer der Kappendachbefeuchtung aus diesem Diagramm abzulesen wird die benötigte Wassermenge aus der Haufwerkshöhe und der Erhöhung der Haufwerksfeuchte bestimmt. Die Bedüsungsdauer ergibt sich dann aus einem Vergleich dieses Wertes mit der Durchflußmenge, welche wiederum aus dem Wasserdruck an der Düse und der Öffnungsgröße der Düse bestimmt wurde. Die Kappendachbefeuchtung erfolgt in Abhängigkeit des Abbaufortschritts und/oder der verstrichenen Zeit. Die Wanderwelle ist damit sowohl ereignis- als auch zeitgesteuert und kann zusätzlich manuell gestartet werden.

Eine zusätzliche Staubquelle stellt der Bruchraum dar. Nach dem Rückvorgang des Schildausbaus geht das Hangende zu Bruch und erzeugt dabei Staub, welcher dann aus dem Alten Mann in den Streb gelangen kann. Als Staubbekämpfungsmaßnahme wird eine Bruchschild- und Heckraumbedüsung betrie-



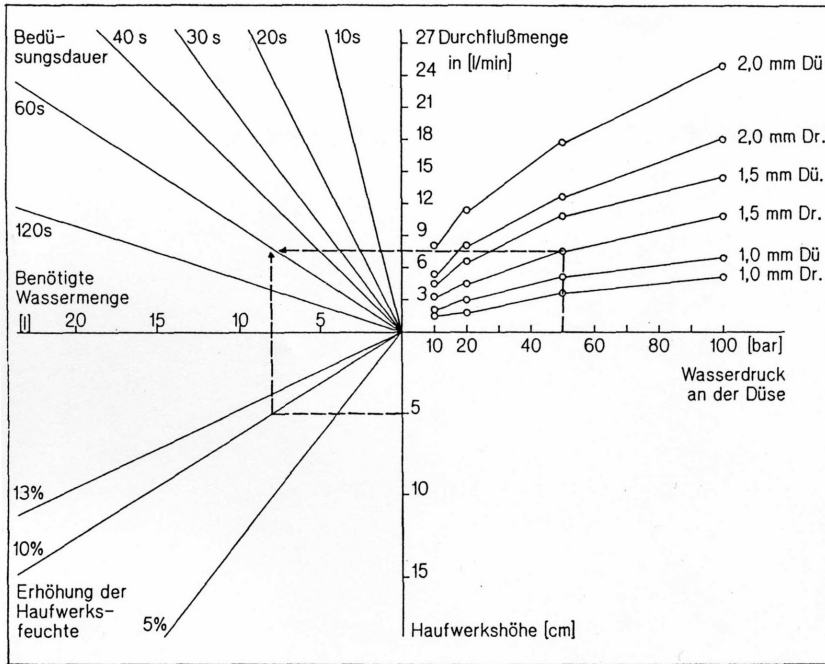


Abbildung 3.3: Nomogramm für die Kappdachbefeuchtung [42].

ben. Hierdurch wird der Bruchraum zeitgesteuert während des Rückvorgangs mit Wasser besprüht. Der Zeitpunkt des Hangendbruchs kann aber nicht genau bestimmt werden und führt dazu, dass möglicherweise keine Bedüsung zu dem Zeitpunkt der Staubenstehung stattfindet und der Staub ungehindert in den Streb wandern kann.

### 3.1.3 Brecher

In den Kohlenabfuhrstrecken werden Durchlaufbrecher eingesetzt, um die grobstückige Kohle aus dem Streb zu zerkleinern. Meist werden Schlagwalzenbrecher verwendet, die beim Zerkleinern Staub erzeugen. Insbesondere bei gegenläufiger Wetterführung kann dies zu einer beachtlichen Erhöhung der Staubkonzentration

nen im Abbau führen. Zur Staubbekämpfung werden als Maßnahmen eine Kombination aus Verkleidung, Bedüsung und/oder Absaugung angewendet. Als Verkleidung werden in der einfachsten Bauart Gummischurzen am Brecherein- und auslauf angebracht. Diese können beim Ziehen des Brechers durch die Vibration und die Beanspruchung der Elemente undichte Stellen bilden. Eine deutliche Verbesserung bieten dabei flexible Verkleidungen. Diese Verkleidungen können nur in Verbindung mit einer anderen Maßnahme wie einer Bedüsungseinrichtung wirksam sein. Die Steuerungssysteme dieser Bedüsungseinrichtung sollen belastungsabhängig erfolgen. Mit der stromabhängig gesteuerten Brecherbedüsung wurde auf Grund verschiedener Schwächen im System ein zeitweise empfindlicher Anstieg des lungengängigen Staubes in den Wettern beobachtet [31]. Die Gründe dafür lagen zum Teil im Steuerungssystem, da die Stromaufnahme des Brecherantriebes von der Brecherarbeit und dadurch von dem Volumenstrom und der Stückigkeit der Kohle abhängig ist. Entgegengesetzt ist die Staubmenge von dem Gehalt an feinkörnigem Material im Brecher abhängig. Zusätzlich stellen Verzögerungen im System einen erheblichen Nachteil dar. Der Zeitraum zwischen der Zufuhr von Kohle in den Brecher bis zum Anstieg der Brecherbelastung und die Ansteuerung der Bedüsungseinrichtung mit der Einstellung des Bedüsungswassers führt zu einer Zerkleinerung der Kohle mit erheblicher Stauberzeugung ohne den Betrieb der Bedüsung. Zur Verbesserung der Steuerung wurde die Ultraschall-Sensortechnik eingeführt. Am Brechereinlauf wird der Sensor installiert, der einen Impuls auf den Förderer strahlt. Durch die Laufzeit der Reflektion wird der Weg und damit die Beladungshöhe des Förderers gemessen. Hierdurch können die Brecherdüsen angesteuert und beladungsabhängig eingestellt werden. Bei der Bedüsungstechnik wurden Erfolge bei der Verwendung des Prinzips der Ejektorbedüsung verbucht [16].

Ein Entstauber kann auch, wenn bautechnisch möglich, eine wirkungsvolle Staubbekämpfungsmaßnahme sein. Für die Brecherentstaubung werden überwiegend Trockenfilteranlagen verwendet. Sie werden auslaufseitig an dem Brecher montiert und je nach Dichtigkeit der Einhausung des Brechers wird 60 bis 150 m<sup>3</sup>/min Luft aus dem Brecherraum angesaugt und gefiltert. Durch den Einsatz von Kompaktelementfilter kann ein Abscheidegrad von 99,998 %, bezogen auf einer äquivalenten Staubkorngröße von 5 µm, erreicht werden [64].

### 3.1.4 Übergaben

Zu den Staubquellen, ausserhalb der Gewinnung, gehören die fördertechnischen Anlagen mit den Übergaben vom Streb- zum Streckenförderer und vom Streckenförderer auf das Förderband [91]. Bei den Übergaben können konstruktive Gestaltungen und zusätzliche Bedüsungssysteme zu einer verringerten Staubeentwicklung führen. Eine schonende Umlenkung des Förderguts und eine Verringerung der Übergabenhöhen führt zu diesem Ziel und wurde schon erfolgreich am Kreuzrahmen des Streb-Streckenübergangs durchgeführt. Im Bereich der Übergabe von Streckenförderer auf das Förderband führt eine Übergabekapselung in Kombination mit einer integrierten Trockenentstaubung, wie schon bei dem Brecher beschrieben, zu einer Beschränkung dieser Staubquelle. Eine vollständige Kapselung kann auch zu Problemen bezüglich der Verstopfungsgefahr, des Zugangs und des eingengten, freien Förderquerschnitts führen. An Stelle der Trockenentstaubung könnte auch eine strömungstechnische Staubabsaugung mit Ejektorbedüsung verwendet werden [34]. Durch die Bewegung des Förderguts auf dem Förderband relativ zum Wetterstrom kann ein Teil des Staubs auf dem Band von den Wetterern aufgenommen werden. Untersuchungen haben gezeigt, dass bei einer Fördergeschwindigkeit von ca. 2 m/s und Wettergeschwindigkeiten zwischen 0,53 und 0,91 m/s sich die Staubkonzentration um ungefähr  $0,1 \text{ mg/m}^3$  für eine Förderlänge von 305 m oder bei der Erhöhung der Produktion zwischen 181 und 454 Tonnen/Schicht erhöht [79].

## 3.2 Reduzierung des Schwebstaubs

Trotz der vorherigen Maßnahmen gelangen Staubpartikel in die Wetter und auch diese sollen, soweit möglich, niedergeschlagen werden. Diese Aufgabe ist von vielen Bedingungen abhängig und gestaltet sich schwieriger als die Maßnahmen zur Reduzierung der Stauberzeugung.

### 3.2.1 Vorbelastung der Wetter

Abhängig von den Betriebspunkten in den Frischwetterstrecken können diese Wetter schon belastet sein. Hierzu zählen vor allem Förderstrecken aber auch Fahrung in den Strecken. Hier gilt es diese Vorbelastung durch Benetzung der Oberflächen oder bessere Planung des operativen Ablaufs so gering wie möglich zu halten.

### 3.2.2 Wettertechnik

Frischwetter reduzieren die Staubkonzentration in der Luft durch Verdünnung und Lenkung der Staubpartikel in der Luft. Das erste Prinzip ist sehr einfach. Die zugeführte Luftmenge wird erhöht und die Staubkonzentration sinkt proportional dazu. Problematisch sind hierbei die Erhöhung der Wettergeschwindigkeiten und der Bedarf an zusätzlichen Einbauten.

Eine Lenkung der geladenen Luft kann dazu führen, dass der Staub aus den Arbeitsbereichen der Mitarbeiter gehalten wird. Es ist vorteilhaft, wenn der Mitarbeiter sich im Frischwetterbereich aufhält. Die Installation von Wettertüchern kann unvorteilhafte Wetterführungen verhindern. Schleichwetter, die von der Kopfstrecke durch den Alten Mann zurück in den Streb ziehen, tragen zusätzlichen Staub vom Bruchraum in den Streb und können durch das Abdichten am Streckenrand verhindert werden. Das Verfahren des Walzenladers am Strebenende kann wettertechnisch bedingt zu erhöhtem Staubaufkommen führen. Durch eine Umleitung der Wetter kann verhindert werden, dass die Stäube direkt in den Arbeitsbereich des Walzenfahrers gelangen. Eine Kombination von Wettertüchern und luftleitenden Bedüsungen können den Staub effektiv aus den Arbeitsbereichen der Beschäftigten halten. Am Walzenlader werden zum Beispiel vor der ersten Walze ein Wettertuch als Wetterteiler installiert und eine

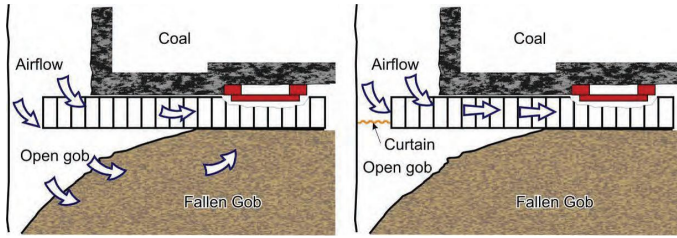


Abbildung 3.4: Wettertuch am Alten Mann [74].

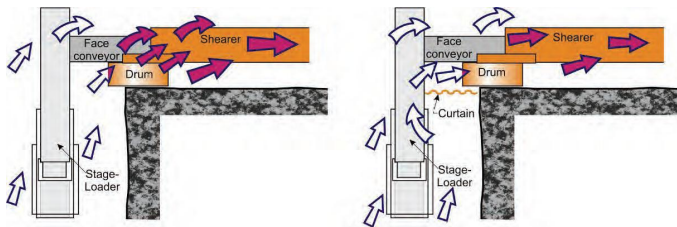


Abbildung 3.5: Wettertuch am Strebstreckenübergang [74].

dahinter geschaltete Düsenreihe leitet den Luftstrom mit dem frisch aufgenommenen Staubpartikeln aus der Gewinnung in Richtung des Kohlenstoßes. An der nachgeführten Walze werden wiederum Leitdüsen angebracht, um die Wetter aus dem Fahrfeld zu halten. Abbildung 3.6 zeigt diese Anordnung am Beispiel des Shearer Clearers.

Bei höheren Wettergeschwindigkeiten im Streb, verursacht durch höhere Förderleistungen, erhöht sich die Gefahr der Aufwirbelung und, dazu gehörig, die Mitnahme von Staubpartikeln im Wetterstrom. Wo früher übliche Wettergeschwindigkeiten von 2 bis 2,3 m/s vorherrschten, können heutzutage noch höhere Wettergeschwindigkeiten vorherrschen [24]. Untersuchungen haben gezeigt, dass mit einer ausreichenden Befeuchtung des Förderguts Wettergeschwindigkeiten von bis zu 5 m/s zu keiner deutlichen Erhöhung der Staubkonzentration führen [23]. Zu diesem Zweck dienen die Gewinnungsfeldbedüsung und, zu früheren Zeiten, das Tränken.

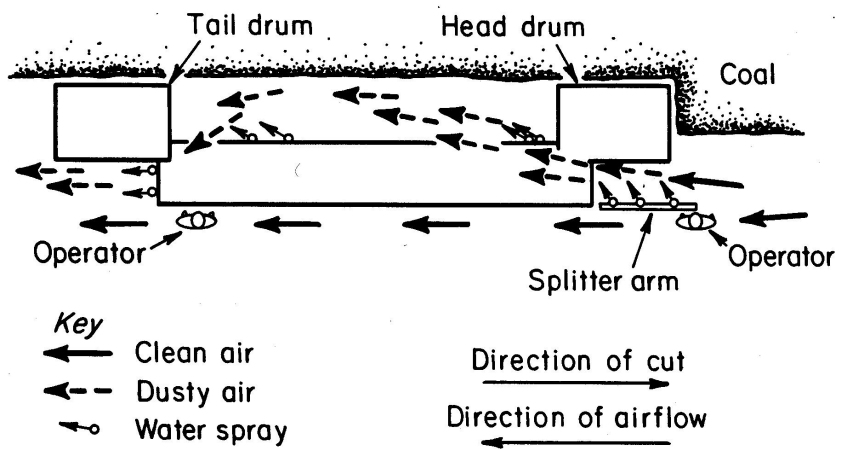


Abbildung 3.6: Shearer Cleaner.

### 3.2.3 Bedüsung

Bedüsungssysteme können nicht nur für die Befeuchtung der Kohle sondern auch zur Niederschlagung des Schwebstaubs angewendet werden, obwohl sich dies deutlich schwieriger gestalten lässt. Wenn die Verhinderung der Stauberzeugung nicht ausreichend gelingt, muss der Schwebstaub angegriffen werden. Zu diesen Bedüsungssystemen ist deutlich weniger geforscht worden als zum Beispiel zur Meißelbedüsung. Ziel dieser Düsen ist es, den in der Luft getragenen Feinstpartikel mit Wassertropfen in Kontakt zu bringen. Dabei erhöht sich die Größe des Gesamtpartikels, der dadurch weniger tief in den Atemtrakt dringen kann und auch schneller aus der Luft ausfällt. Hier gilt es die Trefferwahrscheinlichkeit, so wie die Köhasion, zu gewährleisten.

Der Einsatz eines Netzmittels, wie z.B. Contradust Spray, ist auf Grund seiner positiven Einflüsse, bezüglich des hydraulischen Verschleißes, wünschenswert. Hu et. al. [50] zeigten, wie die Oberflächenspannung des Wassers durch Tenside herabgesenkt wird und der Kontaktwinkel dadurch abnimmt. Dies führt zu einer verbesserten Benetzung des Kohlenstoßes, was wiederum ausschlaggebend für die Minimierung der Staubentstehung bei der Kohlegewinnung ist. Zusätzlich zeigten Kim und Tien [55], dass die Effektivität durch den Einsatz von Netzmitteln bei der Niederschlagung von alveolengängigem Schwebstaub deutlich verbessert werden kann. Diese positiven Eigenschaften befürworten die Verwendung eines Tensides bei der Staubbekämpfung. Hier muss zusätzlich eine gesundheitliche und hygienische Betrachtung bei dem Einsatz dieser Netzmittel stattfinden, um eine Gefährdung der Belegschaft auszuschliessen.

## 3.3 Organisatorische Maßnahmen

Zu den organisatorischen Maßnahmen gehören die Staubmesspläne und die Arbeitseinsatzlenkung. Sie dienen dazu, die Staubbelastung an jedem Arbeitsplatz zu bestimmen. Durch die Aufenthaltsdauer der Mitarbeiter an den jeweiligen Arbeitsplätzen kann die persönliche Staubbelastung errechnet werden. Entsprechend dieser Belastung kann die Arbeitseinsatzlenkung die langfristige Staubexposition regeln.

### **3.3.1 Staubmesspläne**

Die Staubmesspläne dienen zur Durchführung und Auswertung von Staubmessungen in allen untertägigen Betriebspunkten. Sie werden nach §8 der GesBergV durchgeführt. Diese Messungen ermitteln die Einstufung der Betriebspunkte in unterschiedlichen Staubbelaastungsstufen und damit die persönliche Staubbelaastung der Beschäftigten.

### **3.3.2 Arbeitseinsatzlenkung**

Durch die regelmäßigen Staubmessungen und die Ermittlung der persönlichen Staubbelaastung kann eine Arbeitseinsatzlenkung die Exposition der Beschäftigten kontrollieren. Die zulässigen persönlichen Staubbelaastungswerte regeln sich nach der Eignungsgruppe wie in Kapitel 2 dargestellt. Für jede Schicht werden der Betriebsort des Beschäftigten und die dazugehörige Staubbelaastung aus der durchgeführten Staubmessung aufgenommen. Aus allen Schichten wird die persönliche Staubbelaastung über 2 Jahre ermittelt und muss unter dem Grenzwert bleiben. Wird die persönliche Staubbelaastung zu hoch oder erreicht sie die Grenze, muss der Beschäftigte in einem Arbeitsbereich mit einer geringeren Staubbelaastungsstufe eingesetzt werden. Hierdurch wird sichergestellt, dass kein Mitarbeiter einer zu hohen Dauerstaubbelaastung ausgesetzt wird.

### **3.3.3 Automatisierung**

Jeder Automatisierungsschritt kann Beschäftigte aus Arbeitsbereichen mit höheren Staubbelaastungsstufen fernhalten. Durch die Verwendung einer Fernbedienung kann sich der Beschäftigte dann frischwetterseitig für seine Arbeit positionieren.

## **3.4 Entwicklungspotential**

Bei den bisherigen technischen Entwicklungen im Bereich der Staubbekämpfung sind ein Großteil der Fortschritte in der Maschinentechnik zu finden. Untersuchungen zu den technischen und betrieblichen Parametern des Walzenladers waren sehr ausführlich. Zusätzlich kommen die Entwicklungen bei der



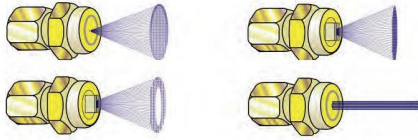
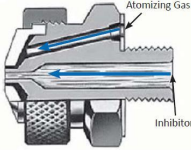
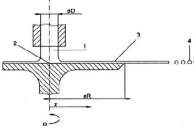
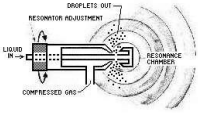
Einhausung, den Entstaubern und den Maßnahmen beim Schreitausbau dazu. Bei diesen ganzen Untersuchungen und Optimierungen sind die einzelnen Bedüsungssysteme nur begrenzt im Detail betrachtet worden. Außer im Bereich der Meißelbedüsung sind kaum Fortschritte zu verzeichnen. Dies bietet ein sehr großes Entwicklungspotential in der genauen Untersuchung der Aufgaben der einzelnen Düsen für die spezifische Staubbekämpfungsmaßnahme für die sie eingesetzt werden und in der Beurteilung der Effektivität bei der Erfüllung dieser Aufgaben. Die Düsen bei der Gewinnungsfeldbedüsung wurden mit dem größten Entwicklungspotential identifiziert und werden detailliert untersucht. Als zweites werden die Düsen an Brechern und Übergaben mit ihren Einhausungen betrachtet. Die weiteren Bedüsungssysteme werden nur ansatzweise behandelt. Dazu muss in erster Linie die Düsentechnik näher betrachtet werden, durch welche die Eigenschaften und die Eignung der Düsen bestimmt werden kann.



## 4 Grundlagen der Düsentechnik

Das Zerstäuben von Flüssigkeiten erfolgt mit Bauteilen, die Zerstäuber oder Düsen genannt werden. Sie können nach der Art der Energiezufuhr klassifiziert werden. Die meist verbreitetste Art der Zerstäubung ist eine Einstoffdruckdüse

Tabelle 4.1: Klassifizierung der Zerstäuber.

Hydraulische Energie	<b>Einstoffdruckdüsen</b> 
Pneumatische Energie	<b>Zweistoffdüsen</b> 
Mechanische Energie	<b>Rotationszerstäuber</b> 
Vibrations Energie	<b>Akustische oder Ultraschall-Zerstäuber</b> 
Elektrische Energie	<b>Elektrostatische Zerstäuber</b>

und verwendet die Eigenenergie der zu zerstäubenden Flüssigkeit. Über den Druckabfall wird die Energie in kinetische Energie umgewandelt und führt zur Zerstäubung. Pneumatische Zerstäuber nutzen die Energie eines Gases. Durch die hohe kinetische Energie des Gases können Wasserstrahlen und -lamellen effektiv zerkleinert werden. Rotationszerstäuber werden an ihrer eigenen Achse angetrieben und leiten die Rotationsenergie der Scheibe in die kinetische Energie der Flüssigkeit, hiermit können homogene Tropfenverteilungen erzeugt werden [17] [94].

Im deutschen Steinkohlenbergbau werden nur Einstoff- und Zweistoffdüsen eingesetzt.

## 4.1 Einstoffdüsen

Im Bergbau werden am häufigsten Einstoffdüsen mit unterschiedlichsten Sprühcharakteristiken zur Zerstäubung verwendet. Sie werden anhand ihres austretenden Flüssigkeitsstrahls in zwei Gruppen unterteilt: in die Strahl- bzw. Turbulenzdüse und die Lamellendüse. Strahlbildende Turbulenzdüsen stellen die einfachste Form von Druckdüsen dar. Abbildung 4.1 stellt eine solche Düse mit den für den Tropfenzerfall wichtigen Kenngrößen schematisch dar. Sie besteht

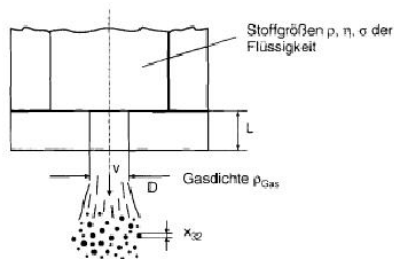


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung einer einfachen Turbulenzdüse.

aus einer runden Öffnung, mit einem Durchmesser  $D$  und einer Länge  $L$ , aus der ein Flüssigkeitsstrahl mit hoher Geschwindigkeit auf Grund des Druckabfalls austritt. Die Geometrie der Düse beeinflusst sowohl den Volumenstrom als auch den charakteristischen Tropfendurchmesser, wie in Abbildung 4.1 darge-

stellt, den sogenannten Sauterdurchmesser  $x_{32}$ .

Zu den Strahldüsen gehören die Vollkegelstrahl- und Vollstrahldüsen, welche unterschiedliche Sprühformen vorweisen. Vollstrahldüsen (VS), siehe Abbildung 4.2, erzeugen einen geschlossenen Flüssigkeitsstrahl, bei der eine Zerstäubung unerwünscht ist. Diese Düsen haben einen stabilen Strahl mit viel Kraft, welcher dann gezielt eingesetzt werden kann. In der Steinkohle werden diese Düsen bei der Kappendachbefeuchtung eingesetzt.

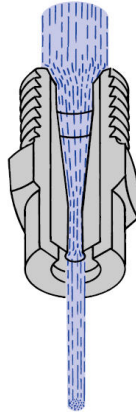


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung einer Vollstrahldüse [3].

Bei den Vollkegelstrahldüsen (VKS) wird zwischen den Axial-, siehe Abbildung 4.3, und Tangentialvollkegelstrahldüsen, siehe Abbildung 4.4, unterschieden. Beide Düsenbauarten erzielen durch die Zugabe eines Dralls eine gleichmäßige Flüssigkeitsverteilung über eine Kreisfläche. Die Drallgebung erfolgt bei der Axial-VKS durch einen in den freien Durchgangsquerschnitt eingesetzten Drallkörper. Dabei entscheidet die Dimensionierung des Drallkörpers über den späteren Strahlverlauf, über die Flüssigkeitsverteilung sowie über die Tropfenbildung. Die Tangential-VKS erzielt ihre Drallgebung durch Fräsungen im Düsenkörper. Diese Vollkegelstrahldüsen werden häufig im Bergbau verwendet, da sie verstopfungsunempfindlich sind. In der Steinkohle werden sie bei der Gewinnungsfeld-, Heckraum- und Übergabenbedüsung eingesetzt.

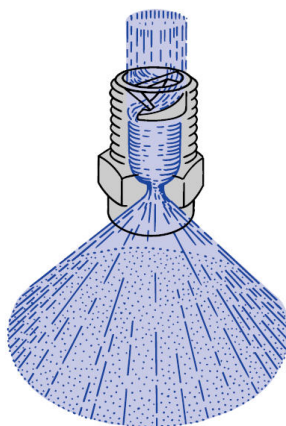


Abbildung 4.3: Axial-Vollkegeldüse [3].

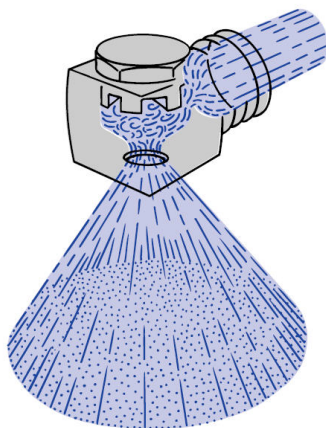


Abbildung 4.4: Tangential-Vollkegeldüse [3].

Bei den lamellenbildenden Düsen werden je nach Lamellenform Hohlkegel- und Flachstrahldüsen verwendet. Die Hohlkegeldüsen werden hinsichtlich ihrer Richtung der Flüssigkeitszufuhr zwischen Axial-Hohlkegeldüsen, siehe Abbildung 4.5, und Excenter-Hohlkegeldüsen, siehe Abbildung 4.6, unterteilt. Hohlkegeldüsen

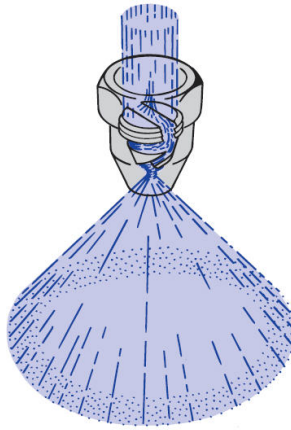


Abbildung 4.5: Axial-Hohlkegeldüse [3].

erzeugen den kleinsten, auf den Düsendurchmesser bezogenen, charakteristischen Tropfendurchmesser. Dabei werden bei Axial-Hohlkegeldüsen feinere Tropfenspektren als bei Excenter-Düsen erzeugt.

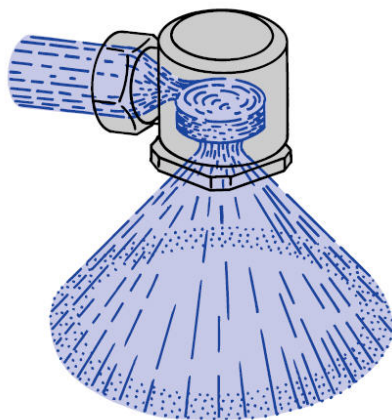


Abbildung 4.6: Excenter-Hohlkegeldüse [3].

Lamellenbildende Flachstrahldüsen (FS), siehe Abbildung 4.7, auch Fächerstrahldüsen genannt, besitzen ein lineares Sprühbild. Durch entsprechende geometrische Gestaltung können Strahlbreite und Sprühbild variiert werden. Möglich ist dabei eine parabel-, trapez- oder rechteckförmige Flüssigkeitsverteilung. Charakteristisch für die Flachstrahldüse ist eine gleichmäßige Flüssigkeits- und Druckverteilung. Verwendung findet sie in Bereichen, in denen ein kompakter, direkt auf das zu bedüsende Objekt richtbarer, gleichmäßig kontrollierter Bedüsungsstrahl benötigt wird.



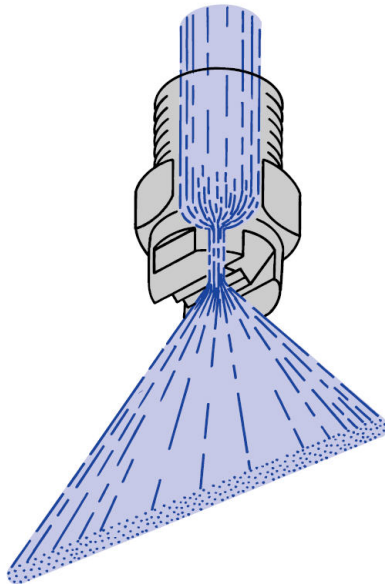


Abbildung 4.7: Flachstrahldüse [3].

## 4.2 Zweistoffdüsen

Um feinste Tröpfchen, im Vergleich zu herkömmlichen axialen Hohlkegeldüsen, zu erzeugen, werden Zweistoffdüsen eingesetzt. Diese Pneumatik-Zerstäuberdüsen arbeiten meist nach dem Flüssigkeitsdruckprinzip, wobei die Zufuhr von Druckluft eine zusätzliche Zerstäubungsenergie für kleinstmögliche Tröpfchen darstellt. Hierbei wird nicht die kinetische Energie der Flüssigkeit für die Zerstäubung genutzt, sondern es wird der Differenzdruck des beaufschlagten Gases ausgenutzt. Je nach Bauart und Massenstromverhältnis der Zweiphasenströmung können unterschiedliche Strömungsformen auftreten, wobei bei der Zerstäubungstechnik die Ring- und Spritzerströmung von Bedeutung sind. Für die Anwendungsbereiche bei der Staubbekämpfung finden Vollkegel-Pneumatik-Zerstäuber mit innerer Mischung auf Grund ihrer großen Reichweite des kreisförmigen Strahls Verwendung.

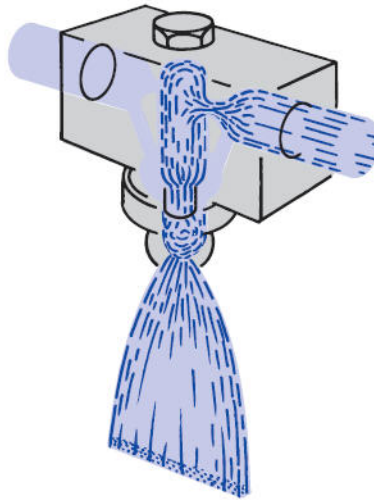


Abbildung 4.8: Pneumatik-Zerstäuberdüse [3].

Bei der pneumatischen Zerstäubung wird der sekundäre Tropfenzerfall betrachtet, wobei die kinetische Energie des strömenden Gases als Druckenergie auf die Wassertropfen wirkt. Diese Tropfen setzen eine aerodynamische Widerstandskraft diesem strömenden Gas entgegen. Jeder Tropfen besitzt auf Grund der wirksamen Oberflächenspannung einen Innendruck bzw. eine Oberflächenspannung. So lange die stabilisierende Oberflächenspannungskraft größer ist als die aerodynamische Widerstandskraft wird kein sekundärer Zerfall erfolgen.

### 4.3 Zerstäubungsmechanismus

Das Zerstäuben von Flüssigkeiten hängt von der Düsenart sowie ihren Betriebsparametern ab. Der Tropfenzerfall von Flüssigkeiten kann durch folgende Mechanismen erfolgen [94]:

- das Abtropfen
- den Flüssigkeitsstrahlzerfall
- den Lamellenzerfall
- die Zerstäubung von Flüssigkeiten durch Gase

#### 4.3.1 Abtropfen

Das Abtropfen stellt die einfachste Form der Tropfenbildung bei geringem Volumenstrom dar. Durch die Einwirkung der Schwerkraft und der Oberflächenspannungskraft bilden sich gleichmäßig abgeschnürte Tropfen, siehe Abbildung 4.9.

#### 4.3.2 Flüssigkeitsstrahlzerfall

Bei der Betrachtung von Flüssigkeitsstrahlen kann die Tropfenbildung nach der Austrittsgeschwindigkeit charakterisiert werden. Im Allgemeinen werden drei Zerfallsprozesse auf Grund der Ursachen von axisymmetrischen Wellen, asymmetrischen Wellen und aerodynamischen Kräfte unterschieden, siehe Abbildung 4.10, und entsprechen den Geschwindigkeiten in der Größenordnung 1, 10 und 100 m/s. Bei der Tropfenbildung, infolge von axisymmetrische Wellen, führen zufällige interne Störungen zu der Bildung von engen Bändern im Strahl. Der Flüssigkeitsdruck ist auf Grund des Gleichgewichts zwischen Druck- und Oberflächenspannungskräften in diesen engen Bändern höher als in den breiten Bändern. Dies drückt die Flüssigkeit von den engen zu den breiten Bändern und führt zu der Bildung von Tropfen. In diesem Fall entstehen die Tropfen nur wegen der Oberflächenspannung. Bei der Erhöhung der Flüssigkeitgeschwindigkeit treten erhöht aerodynamische Kräfte auf, die eine Verzerrung der Strahlachse zur Folge haben. Sie werden immer größer durch die Druckeinwirkung

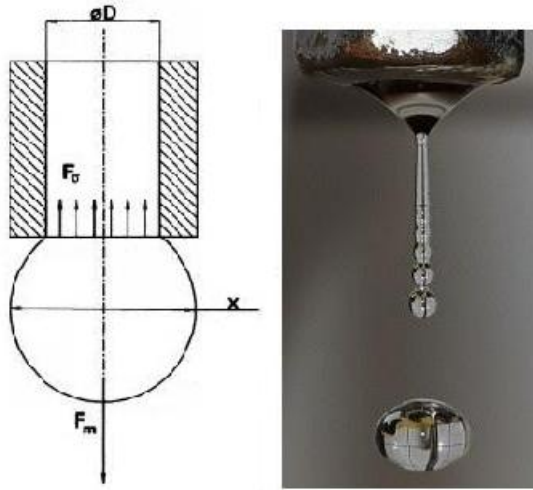


Abbildung 4.9: Abtropfen.

der Umgebungsluft. Die Richtung der Kräfte ist einheitlich mit den Pfeilen in Abbildung 4.10b, da die vom Strahl mitgeführte Luft im Bereich der Konvexitäten beschleunigt und im Bereich der Konkavitäten verzögert wird. Hieraus resultierend aus den asymmetrischen Wellen sind Unterdrücke und Überdrücke in den Konvexitäten und Konkavitäten, welche zu der Bildung von Tropfen führen, die kleiner als bei den axisymmetrischen Wellen sind. Durch sehr hohe Geschwindigkeiten treten große aerodynamische Kräfte auf, die zur eigentlichen Zerstäubung, der Bildung von kleinen Tropfen, führen. Dieser Zerfall ist in drei Zonen unterteilt, siehe Abbildung 4.10c. In der ersten Zone AB ist der Strahl noch kompakt und Vibrationen entstehen. Die Länge der Kompaktzone verringert sich mit steigender Austrittsgeschwindigkeit, erreicht aber nicht den Wert 0. Der Zerfall in Zone BC erfolgt auf Grund von Wellen sehr kleiner Länge. Bei noch höheren Austrittsgeschwindigkeiten zerfällt der Strahl in noch kleinere Strahlen und anschließend in Tropfen bevor sich Wellen bilden können.[17]

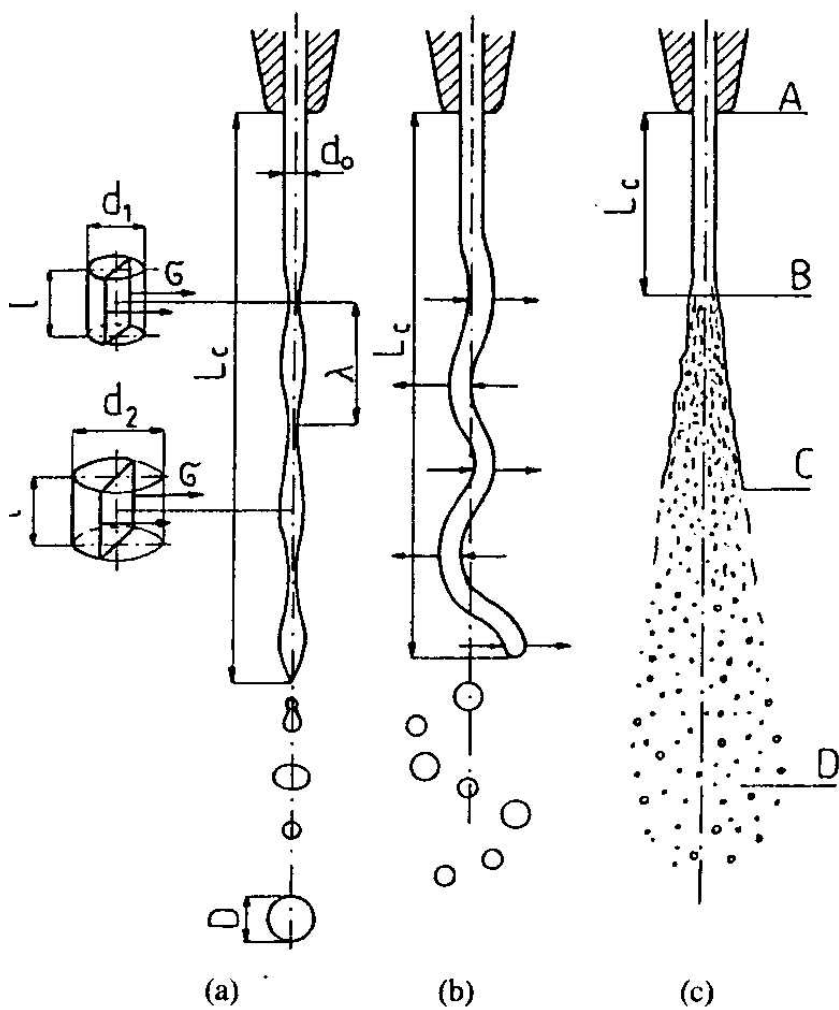


Abbildung 4.10: Zerwellen a) axialsymmetrische Wellen, b) asymmetrische Wellen, c) aerodynamische Kräfte.

### 4.3.3 Lamellenzerfall

Bei den nicht strahlbildenden Düsen werden Flüssigkeitslamellen erzeugt, welche mit einem ähnlichen Mechanismus wie beim Flüssigkeitsstrahlzerfall zerfallen. Dabei kann der Zerfall in drei Mechanismen unterteilt werden, siehe Abbildung 4.11: Randkontraktion, aerodynamische Wellenbildung und turbulenter Zerfall [89]. In der Regel dehnen sich die Flüssigkeitslamellen quer zur

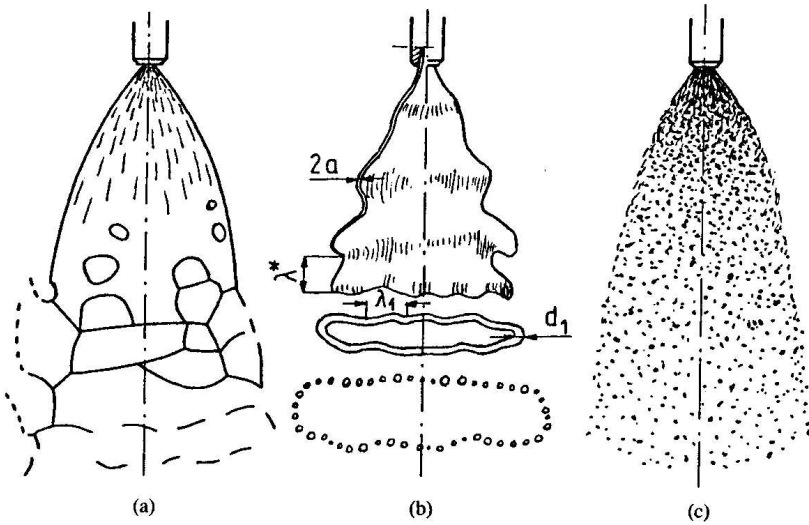


Abbildung 4.11: Lamellenzerfall a) Randkontraktion, b) aerodynamische Wellenbildung, c) turbulenter Zerfall [17].

Strömungsrichtung aus und werden mit zunehmendem Abstand zur Düse immer dünner, wodurch Löcher entstehen und sich Randwulste bilden. Dieser wird instabil und formt dann grobe Tropfen. Bei höheren Austrittsgeschwindigkeiten treten Turbulenzen auf und die Lamellen erfahren Wellenstörungen. Ringförmige und umlaufende Wellen bilden sich durch die anwachsenden Schwingungsamplituden und zerfallen. Diese Lamellenfragmente bilden dann Flüssigkeitsfäden, die über den Raleigh'schen Strahlzerfall zu Tropfen werden. Die aerodynamische Wellenbildung gilt für die üblichen Betriebsbereiche der meisten Lamellendüsen.

Für sehr hohe Austrittsgeschwindigkeiten tritt durch die Überlagerungen von Turbulenzen eine Zerstäubung ein, bevor sich Wellen bilden [17][89][94].

#### 4.3.4 Bildung des Sprühbildes

Die Zerstäubung eines Fluids durchläuft dabei in der Regel folgende fünf Phasen:

1. Strömung des Fluids innerhalb der Düse
2. Zerfall des Fluids in Tropfen
3. Ausbildung eines Bereichs mit ausgebildeten Tropfen
4. Aufprallnahbereich des Sprays auf die zu benetzende Oberfläche
5. Tropfenaufprall und Flüssigkeitsfilmbildung

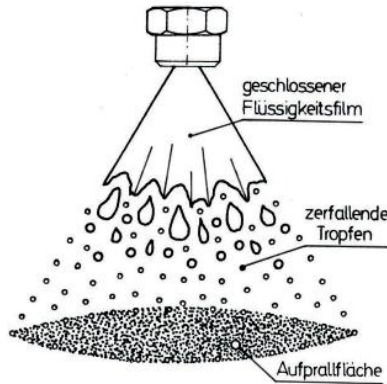


Abbildung 4.12: Zerstäuben eines Fluids.

Abbildung 4.12 zeigt wie ein geschlossener Flüssigkeitsfilm aus einer Düse austritt und dann zerfällt bis sich stabile Tropfen bilden und diese wiederum auf einer Oberfläche aufprallen und eine Sprühfläche charakteristisch für diese Düse bilden.

Je nach Düsenform gestaltet sich das Sprühbild und somit auch die Sprühfläche



unterschiedlich. Eine Auswahl unterschiedlichster Düsen und ihrer Sprühflächen ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

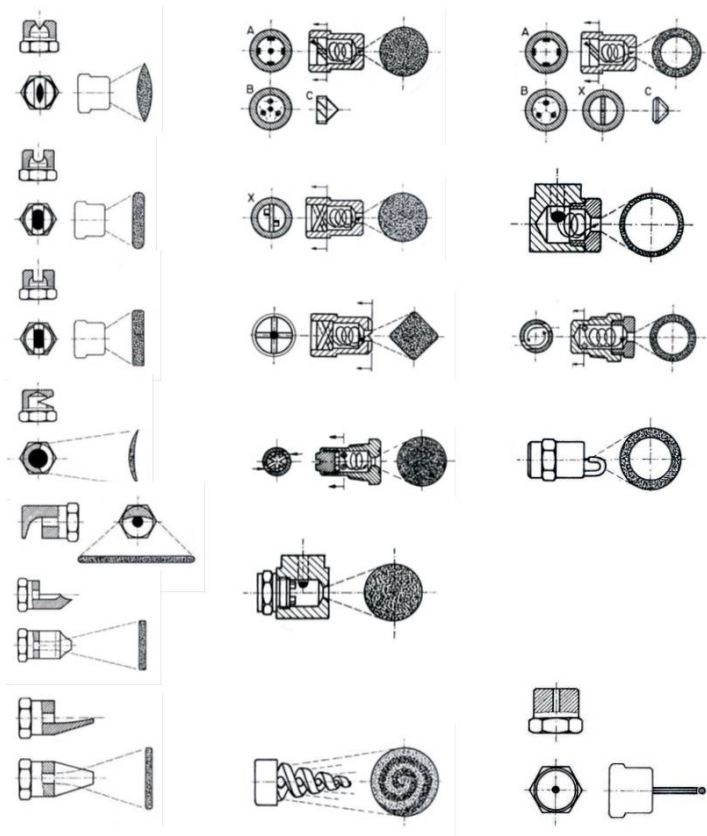


Abbildung 4.13: Darstellung unterschiedlicher Düsen mit ihren Sprühflächen.

## 4.4 Eigenschaften von Düsen

Zu den wichtigen Eigenschaften von Düsen gehören die Spritzcharakteristiken, der Volumenstrom, der Spritzwinkel und die Spritzbreite, die Tropfengrößen, und die Aufprallkraft. Diese werden primär von den Betriebsbedingungen und sekundär von den Flüssigkeitseigenschaften beeinflusst. Die folgende Tabelle zeigt den Einfluss der Stoffeigenschaften von Fluiden auf die Düsenkennwerte. Dieser Einfluss ist nur bei geringen Austrittsgeschwindigkeiten oder unter Vakuum ausgeprägt. Je nach Düsentyp und Düsengröße können die Einflüsse im Einzelfall erheblich schwanken. Wie aus der Tabelle ersichtlich, wirken sich auf die Spraybildung verschiedene physikalische Zustände unterschiedlich aus.

Tabelle 4.2: Düsenkennwerte und ihre Einflussfaktoren.

Düsenkennwerte	Erhöhte Dichte	Erhöhte Viskosität	Erhöhte Flüssigkeitstemperatur	Erhöhte Oberflächenspannung
Strahlqualität	unbedeutend	schlechter	besser	unbedeutend
Tropfengröße	unbedeutend	steigt	abnehmend	steigt
Spritzwinkel	unbedeutend	abnehmend	steigt	abnehmend
Volumenstrom	abnehmend	bei Voll-/Hohlkegeldüsen ansteigend, bei Flachstrahldüsen abnehmend	Abhängig von Spritzflüssigkeit und Düsentyp	kein Einfluss
Aufprallkraft	unbedeutend	abnehmend	steigt	unbedeutend
Tropfengeschwindigkeit	abnehmend	abnehmend	steigt	unbedeutend
Verschleiß	unbedeutend	abnehmend	Abhängig von Spritzflüssigkeit und Düsentyp	kein Einfluss

### 4.4.1 Sprühwinkel

Der Sprühwinkel ist, insbesondere bei hohen Reynolds'zahlen, von der ausströmenden Flüssigkeit und den damit verbundenen turbulenten Strömungsbedingungen abhängig. Das Verhältnis der Bohrungslänge zum Bohrungsdurchmesser der Düse beeinflusst diese Strömungsverhältnisse. Ist das Verhältnis  $L/D$  hinreichend groß, kommt es schnell zur Kavitation in der Düsenmündung und damit zu einer Aufweitung des Flüssigkeitsstrahls. Dieses hat wiederum zur Fol-

ge, dass der Sprühwinkel im Gegensatz zur nichtkavitativen Strömung breiter ist. Der Sprühwinkel wird zudem durch die umgebende Gasatmosphäre beeinflusst. Der Sprühwinkel einer Düse wird unmittelbar nach dem Düsenaustritt ermittelt und ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Bei zunehmendem Sprühabstand ist die Angabe der Spritzbreite in Abhängigkeit vom Spritzabstand besser anzuwenden.

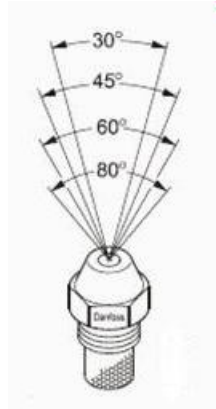


Abbildung 4.14: Sprühwinkel.

#### 4.4.2 Effektive Spritzbreite

In der Praxis ändert sich beim Sprühen die resultierende Spritzbreite nicht linear mit der Entfernung. Wie aus Abbildung 4.15 ersichtlich, beginnt die Schwerkraft und die Umgebungsluft auf den Spritzwinkel einzuwirken und lässt diesen seitlich abfallen.

#### 4.4.3 Tropfengeschwindigkeit

Die Tropfengeschwindigkeit und die Volumenausdehnung des Sprays stehen in einem direkten Zusammenhang. Umso größer die Volumenausdehnung eines Sprays, desto schneller ist eine Absenkung der Austrittsgeschwindigkeit der Tropfen zu erwarten. Die Düsen mit einer geringeren räumlichen Ausdehnung

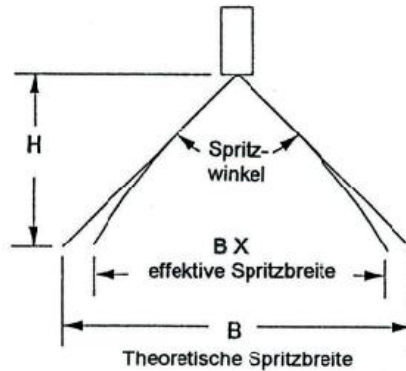


Abbildung 4.15: Effektive Spritzbreite [40].

des Sprühstrahls, wie etwa bei Flachkegeldüsen, erreichen eine höhere Tropfengeschwindigkeit als Vollkegeldüsen. Eine höhere Geschwindigkeit der Tropfen bei gleichbleibenden Betriebsparametern (Volumenstrom, Druck) kann also nur durch die Variation der Düsentypen hinsichtlich des Einsatzes einer Flachkegeldüse erreicht werden.

Die Erhöhung des Betriebsdrucks stellt die effektivste Maßnahme zur Erhöhung der Tropfengeschwindigkeit dar. Direkt am Düsenaustritt, also im Bereich des noch zusammenhängenden Flüssigkeitsstrahls, hat die Sprühcharakteristik einer Düse noch keinen Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit des Fluids. Die Strömung kann unabhängig vom Düsentyp als Vollstrahl angesehen werden. Die Austrittsgeschwindigkeit an der Düsenöffnung stellt die maximal erreichbare Geschwindigkeit des Fluids dar. An jedem Ort im Abstand  $x$  von der Düsenöffnung wird die Tropfengeschwindigkeit kleiner als direkt am Düsenaustritt sein. Die maximale Austrittsgeschwindigkeit  $v_{\max}$  aus der Düsenmündung kann folgendermaßen aus der Druckdifferenz und der Dichte abgeschätzt werden:

$$v_{\max} \simeq \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \text{ in [m/s]} \quad (4.1)$$

Ist der (runde) Düsenaustritt vollständig mit Flüssigkeit gefüllt, resultiert hieraus der maximal mögliche Volumenstrom, der bei einer vorgegebenen Druckdiffe-

renz  $\Delta p$  und einem definierten Bohrungsdurchmesser  $D$  austreten kann:

$$V_{\max} = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \text{ in } [\text{m}^3/\text{s}] \quad (4.2)$$

Durch den Anstieg des Drucks nimmt die durchschnittliche Tropfengröße ab. Dieser Effekt gilt solange, bis sich eine minimale durchschnittliche Tropfengröße einstellt. Oberhalb gewisser Werte hat der Betriebsdruck also keinen messbaren Einfluss mehr auf die Tropfengröße. Um überhaupt zerstäuben zu können, muss im System ein Minimaldruck von 0,3 bis 0,5 bar vorhanden sein.

#### 4.4.4 Aufprallkraft

Die Aufprallkraft ist der Flächendruck, der bei der Einwirkung eines Sprühstrahles auf einer Oberfläche, entsteht. Um diese Kraft zu bestimmen, wird zuerst die theoretische Gesamtaufprallkraft,  $I$ , berechnet [10][40].

$$I = 0,024 \dot{V} \sqrt{P} \text{ in } [\text{N}/\text{cm}^2] \quad (4.3)$$

Diese muss dann an die Düse angepasst werden. Dazu wird die theoretische Gesamtaufprallkraft mit einem Faktor multipliziert. Dieses Verhältnis ist in Tabelle 4.3 für verschiedene Düsentypen und Spritzwinkel dargestellt.

Die Aufprallkraft hängt von dem Volumenstrom, der Tropfengeschwindigkeit und dem Spritzwinkel ab. Vollstrahldüsen haben die höchste Aufprallkraft, gefolgt von Flachstrahldüsen. Mit steigender Strahlbreite sinkt die Aufprallkraft.

#### 4.4.5 Tropfengröße

Die zuvor beschriebenen Bauarten und Funktionsmechanismen von Düsen erzeugen ein Spray mit heterogener Tropfengröße, dem so genannten polydispersen Spray. Die Beschreibung des charakteristischen Tropfendurchmessers kann im Idealfall als kugelförmig angesehen werden.

Aus diesen Tropfenverteilungen können unterschiedliche Kenngrößen ermittelt werden. Als wichtigste Größen sind die x10, x50, x90, SMD und c.opt Werte zu nennen. Diese sind wie folgt definiert:

Tabelle 4.3: Aufprallkraft im Abstand 30 cm von der Düse.

<b>Spritz- bild</b>	<b>Spritz- winkel</b>	<b>Totale Aufprallkraft</b>	<b>Aufprallkraft in % per cm<sup>2</sup></b>
Vollstrahl	0°	96% bis 99%	-
Flachstrahl	15°	90% bis 95%	30%
	25°		18%
	35°		13%
	40°		12%
	50°		10%
	65°		7%
Vollkegel	89°		5%
	15°	85%	11%
	30°	81%	2%
	50°	77%	1%
	65°	70%	0,4%
	80°	61%	0,2%
Hohlkegel	100°	50%	0,1%
	60° – 80°	50%	1-2%

- $x_{10}[\mu\text{m}]$  - 10% der Tropfen bezogen auf das Gesamtvolumen sind kleiner als dieser Durchmesser.
- $x_{50}[\mu\text{m}]$  - 50% der Tropfen bezogen auf das Gesamtvolumen sind kleiner bzw. größer als dieser Durchmesser.
- $x_{90}[\mu\text{m}]$  - 90% der Tropfen bezogen auf das Gesamtvolumen sind kleiner als dieser Durchmesser.
- SMD - Sauterdurchmesser: Tropfengröße eines monodispersen Sprays mit gleicher volumenbezogener Oberfläche, wie die damit gekennzeichnete polydisperse Verteilung.
- c.opt - Optische Konzentration: Abschwächung der mittleren Intensität des Laserstrahls durch die Tropfenkonzentration im Messbereich.

Bei strömungstechnischen Anwendungen wird meistens der Sauterdurchmesser betrachtet.

Bei der Veranschaulichung der Ergebnisse aus der Partikelgrößenanalyse werden meist graphische Darstellungen [1] zur Verdeutlichung der Partikelgrößenverteilungen verwendet. Abbildung 4.16 zeigt eine solche beispielhafte Verteilung. An der x-Achse ist die Partikelgröße logarithmisch aufgetragen. An der linken y-Achse ist die Volumenverteilungssumme dargestellt. Die Volumenverteilungssumme,  $Q3(x)$  [%], gibt für jeden Punkt der Verteilung die relative Menge von Partikeln kleiner gleich der Partikelgröße  $x$  an. Sie erstreckt sich zwischen 0 und 100 %. An der rechten y-Achse ist die dimensionslose Verteilungsdichte,  $q3 * (x)$  [-], aufgetragen. Sie errechnet sich aus der Ableitung der Verteilungssumme und stellt den Volumenanteil für die Klassenbreiten dar. Aus diesen graphischen Darstellungen kann die Verteilung der Tropfengrößen besser verglichen werden. Ein Vergleich des Sauterdurchmessers bietet nur einen Wert und ist für vergleichende Berechnung sehr nützlich aber nicht für die Betrachtung von Veränderungen im Sprühbild. Ein Kurvenvergleich zeigt deutlicher, welche Größenfraktionen ausgeprägt sind und ermöglicht eine gute Gegenüberstellung unterschiedlicher Tropfengrößenverteilungen.

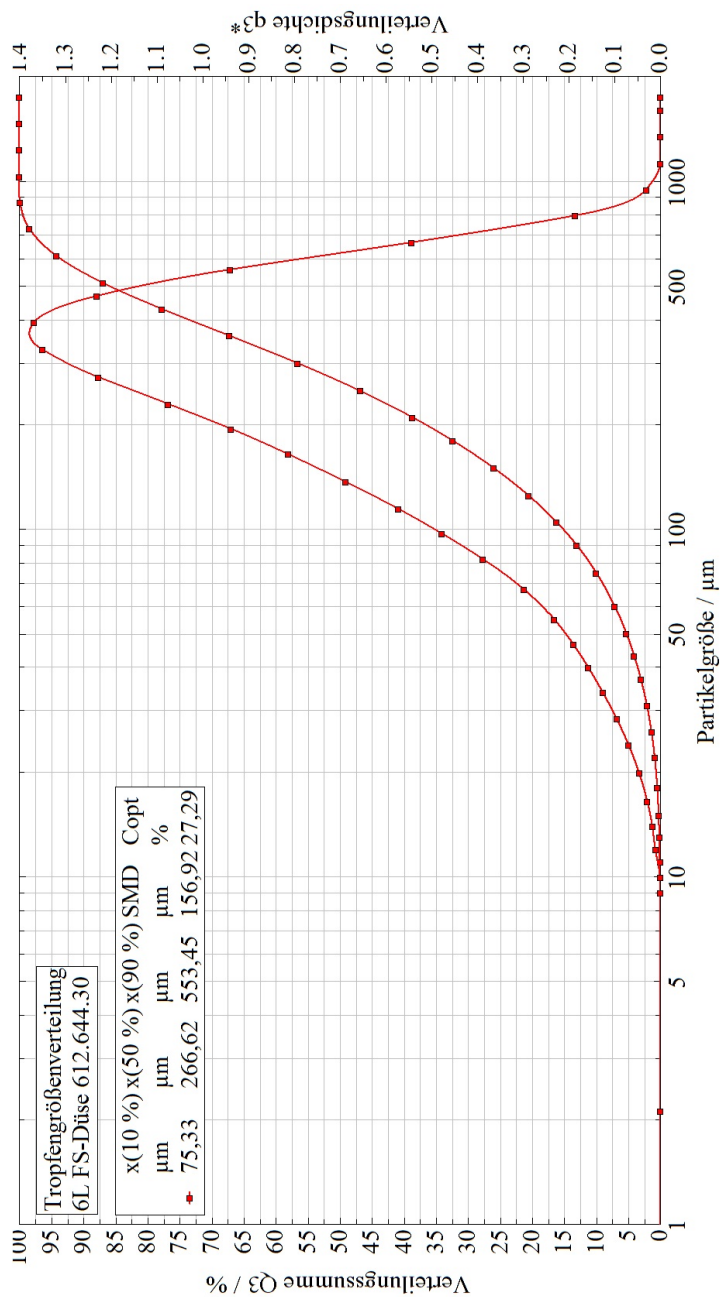


Abbildung 4.16: Partikelgrößenanalyse.



## 4.5 Anforderungen an das Bedüsungssystem

Bei der Entwicklung neuer Bedüsungssysteme und -anordnungen müssen zur Gewährleistung eines sicheren Betriebs wichtige Anforderungen an das Gesamtsystem gestellt werden. Das hydraulische System muss ausgelegt sein, um den maximalen Wasserbedarf abdecken zu können, dazu gehören die Durchmesser der Wasserzuleitungen. Die Gesamtinstallation soll vor Beschädigungen durch das Herabfallen von Kohle und Gestein sichergestellt werden. Abbildung 4.17

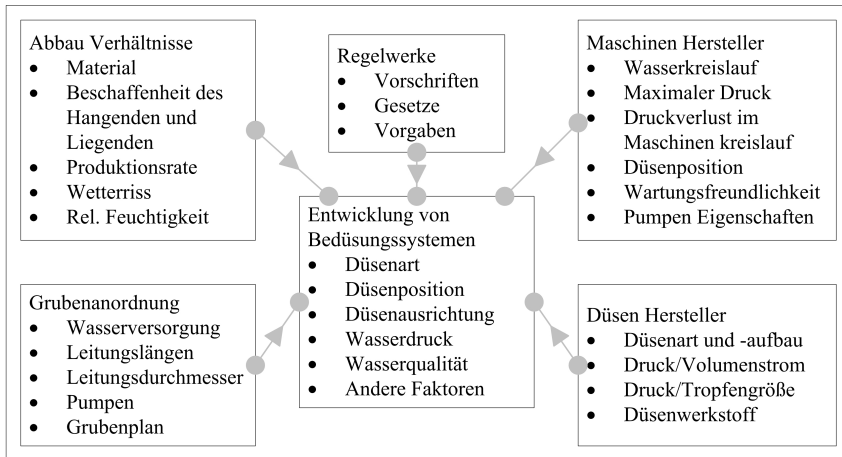


Abbildung 4.17: Faktoren bei der Staubbekämpfung.

gibt einen Überblick über die Faktoren, die einen Einfluss auf die Bedüsungssysteme bei der Staubbekämpfung haben können.

Die spezifischen Anforderungen zeigen die Bedürfnisse der einzelnen Einsatzorte. Die allgemeinen Anforderungen sollen die Bergbaugauglichkeit der Düse garantieren. Das Grubenwasser wird grob vorgefiltert, wobei meistens 100 µm Filter und manchmal sogar 50 µm Filter eingesetzt werden. Versuche haben gezeigt, dass Düsen mit einer Düsenaustrittsöffnung kleiner als 0,6 mm zu Verstopfungen führen können. Deswegen sollte diese Grenze nicht unterschritten werden. Die Bauform der Düse muss robust sein. Das heißt, es dürfen keine zerbrechlichen Kanten oder Anbauten vorhanden sein wie zum Beispiel bei einer

Zungen- oder Löffeldüse. Das Material darf nach dem Kontakt mit dem Grubenwasser nicht stark korrodieren oder verschleifen. Als Material wird dafür meistens Messing verwendet. Der Einbau und Austausch der Düsen muss einfach erfolgen. Bei einem Wechsel muss eine falsche Positionierung verhindert werden. Flachstrahldüsen müssen deswegen bereits in einer Aufnahme ausgerichtet montiert sein, welche dann nur in einer Position installiert werden kann.

## 5 Prüfstand

Die Entwicklung neuer Bedüsungssysteme oder -anordnungen verlangt nach einer Möglichkeit diese zu analysieren und zu bewerten. Dazu wurde der bestehende Windkanal am Institut für Bergbau der TU Clausthal weiter entwickelt [80]. Die Grundkonstruktion des Kanals besteht aus 2 m Blechprofilsegmenten mit einem quadratischen Querschnitt mit Kantenlängen von 1 m. Zusammengefügt wird die Gesamtgeometrie, wie in Abbildung 5.1 dargestellt, erreicht. Am

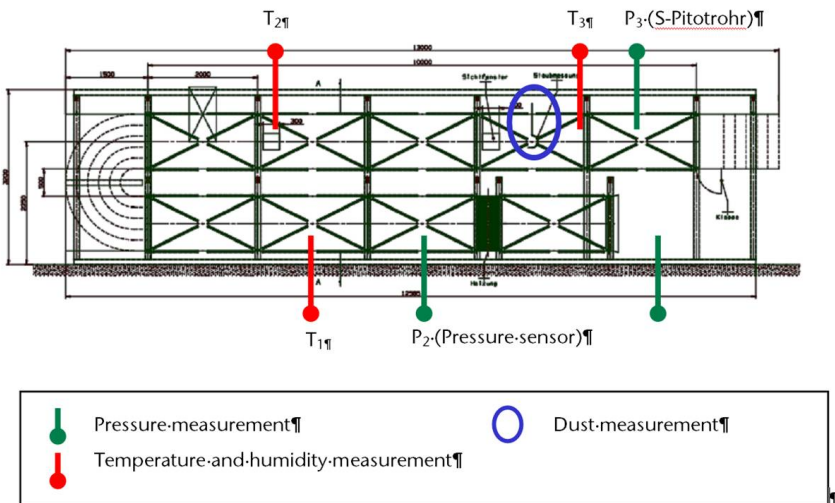


Abbildung 5.1: Windkanal mit Messpunkten [80].

Ende des unteren Bereichs ist ein Gitter montiert, durch das die Umgebungsluft angesaugt wird. Danach strömt sie durch einen Heizregister, eine Temperaturausgleichsstrecke und einen  $180^\circ$  Krümmer. Hier beginnt dann die eigentliche

Messstrecke mit einem Gleichrichter und 4 m Kanalstrecke als strömungstechnische Beruhigungszone mit einer äquivalenten Länge von 10 m. An diesem Punkt wird der Staub in den Kanal eingeblasen. In dem nächsten Kanalsegment sind für die Montage der Bedüsungseinrichtung 3 x 12 Löcher auf den gesamten Umfang des Kanals angeordnet verteilt. Nach einer 5 m langen Partikel/Tropfen Interaktionszone findet die Staubkonzentrationsmessung statt. Dahinter ist die Verjüngung des Kanals auf den Lüfterdurchmesser. Nach der saugenden Anordnung des Lüfters wird die belastete Luft durch Lutten nach außen in einen Fangsumpf geleitet. Der Windkanal mit seinen Einbauten ist in Abbildung 5.2 dargestellt.



Abbildung 5.2: Windkanal.

5.1 Technische Ausstattung

Für den Betrieb des Windkanals wurde die technische Ausstattung variabel ausgelegt. Dazu gehören die Lüfteranordnung, das Heizregister, die Staubaufgabe und die Bedüsungsvorrichtungen.

5.1.1 Lüfter

Für die Bewetterung des Windkanals ist ein Axiallüfter der Firma Korfmann (Typ ESN 6-150) mit saugender Anordnung installiert. Die Lüfterkennlinie ist in Abbildung 5.3 dargestellt. Die Ansteuerung des Lüfters erfolgt mittels eines Frequenzumrichters. Durch Luftgeschwindigkeitsmessungen im Windkanal wurde das Verhältnis zwischen Lüfterdrehzahl und Wettergeschwindigkeit aufgenommen. Dieser Zusammenhang ist für die Wettergeschwindigkeiten, die im

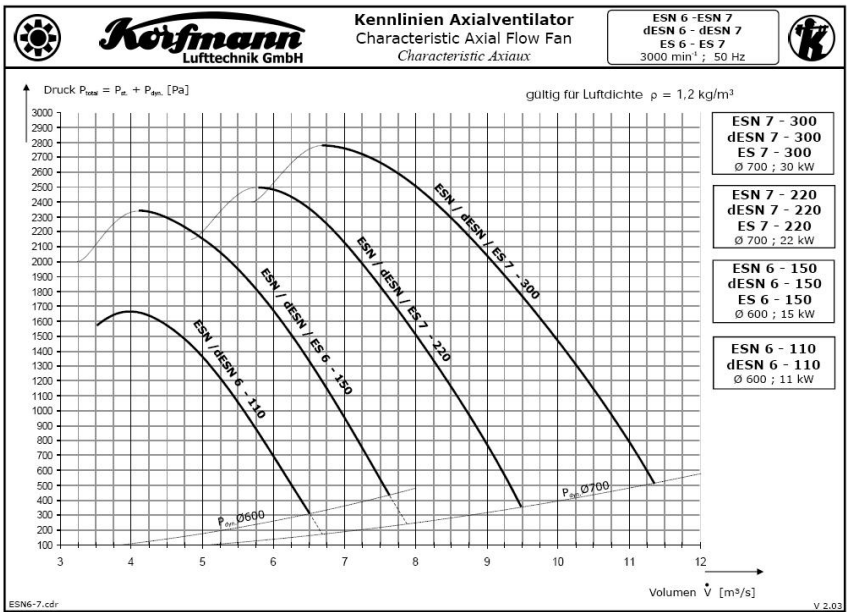


Abbildung 5.3: Lüfterkennlinie [11].

Versuch verwendet wurden, in Tabelle 5.1 dargestellt.

Tabelle 5.1: Verhältnis zwischen Lüfterdrehzahl und Wettergeschwindigkeit[80].

<b>Lüfterdrehzahl</b>	<b>Mittlere Geschwindigkeit</b>
600 1/min	0,9 m/s
2000 1/min	3,32 m/s
3000 1/min	5,04 m/s

### 5.1.2 Heizregister

Das Heizregister besteht aus neun Heizelementen, die einzeln angesteuert werden können und hat eine Gesamtleistung von 280 kW. Heizelement 5 kann zusätzlich manuell geregelt werden. Um die Wettertemperatur im Kanal einzustellen, muss diese manuell eingestellt werden. Der Temperaturverlauf wird beobachtet und einzelne Heizelemente werden zu- oder abgeschaltet, bis die erwünschte Temperatur eingestellt ist. Bei höheren Wettergeschwindigkeiten bleibt diese Einstellung stabil und muss nicht nachgeregelt werden. Bei geringeren Wettergeschwindigkeiten ist die Wärmemenge zu groß und die Erfahrung des Bedieners ist für die Nachregelung gefragt, um zu große Schwankungen der erwünschten Temperatur zu verhindern.

### 5.1.3 Staubaufgabe

Das Einblasen des Staubs muss annähernd konstant erfolgen. Dazu erfolgt die Staubaufgabe in zwei Stufen. Ein Drehzahl-geregelter Schneckendosierer zieht den im Trichter gelagerten Staub in der gewünschten Menge heraus und liefert diesen zu der Vorkammer des Druckluftejektors, siehe Abbildung 5.4. Dadurch wird ein Teil der impulsartigen Förderung der teilgefüllten Schnecke ausgeglichen. Der Druckluftejektor liefert die Energie für die Dispergierung des Staubs, und das Staub/Luft Gemisch wird über ein geschwungenes Rohr in die strömende Luftmenge im Kanal eingeleitet. Die injizierte Staubmenge ist proportional zur Schneckendrehzahl. Dieses Verhältnis ist in Abbildung 5.5 dargestellt.



Abbildung 5.4: Staubaufgabe mit Schneckendosierer und Druckluftejektor.

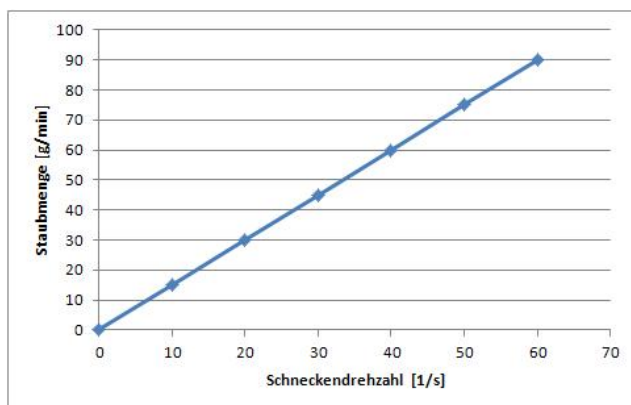


Abbildung 5.5: Verhältnis zwischen Staubmenge und Drehzahl des Schneckendosierers.

Als Prüfstaub wurde Schiefermehl verwendet, welches eine Partikelgrößenverteilung wie in Abbildung 5.6 dargestellt aufweist.

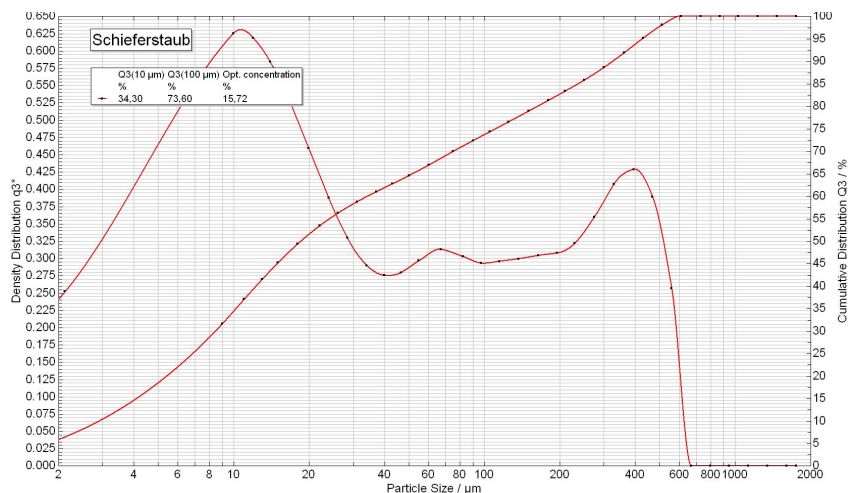


Abbildung 5.6: Partikelgrößenverteilung des Schieferstaubs.

### 5.1.4 Bedüsungsvorrichtung

Die Untersuchung von Düsen unterschiedlichster Bauarten verlangt eine sehr flexible Vorrichtung für ihren Einbau und deren Einstellung. Das wichtigste Element ist die Pumpe, welche den erforderlichen Druck und Volumenstrom liefern muss. Zu diesem Zweck können zwei unterschiedliche Pumpen verwendet werden. Für die Hochdruckdüsen, wie zum Beispiel bei der Meißelbedüsung am Walzenlader verwendet werden, wird eine Hochdruckpumpe verwendet, die im Volumenstrom bei 9 l/min begrenzt ist. Bei Düsen mit größerem Wasserdurchsatz wird eine mehrstufige Kreispumpe angewendet, die 40 l/min bei 40 bar erreicht. Der Betriebsdruck an der Düse wird dann mit by-pass Ventilen geregelt. Die Wasserentnahme kann entweder direkt aus der Zuleitung des Gebäudeanschlusses oder einem Mischbehälter erfolgen. Der benötigte Vordruck aus dem Mischbehälter wird entweder durch Anheben des Behälters oder durch



die Vorschaltung einer Saugpumpe erzeugt. Zusätzlich kann das Wasser entweder mit einem Durchlauferhitzer oder mit Heizspiralen im Mischungsbehälter vorgewärmt werden.

## 5.2 Messtechnik

Für die Auswertung der Versuche am Windkanal ist eine ausführliche Messtechnik notwendig, um alle klimatischen und staubtechnischen Werten aufzunehmen.

### 5.2.1 Klima

Die klimatechnischen Kennwerte müssen an unterschiedlichen Stellen im Windkanal aufgenommen werden, um die Effekte und Änderungen begutachten zu können. Temperatur und Feuchtigkeitssensoren sind hinter dem Heizregister, vor der Messstrecke und nach der Messstrecke installiert. Zusätzlich wird noch der Differenzdruck aufgenommen. Diese Messpunkte sind in Abbildung 5.1 schematisch dargestellt.

### 5.2.2 Staub

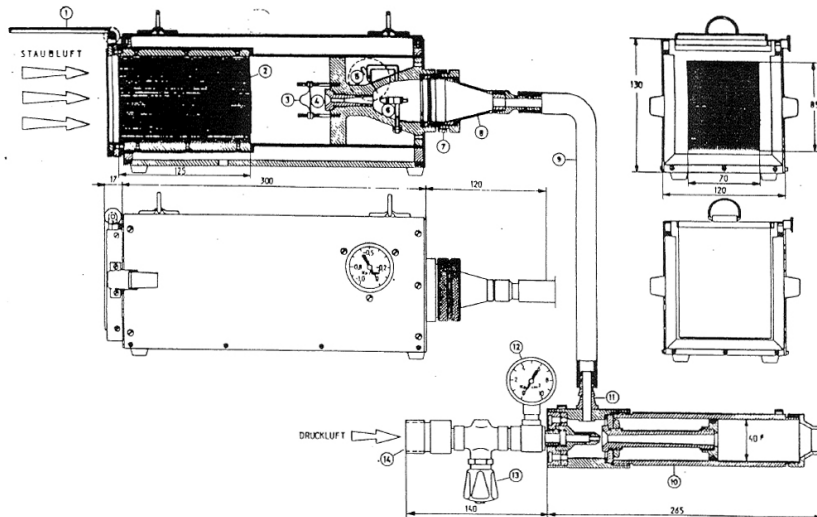
Die Ermittlung der Staubkonzentration in der Luft kann sowohl gravimetrisch als auch optisch erfolgen, um die Staubmenge je Volumeneinheit der Luft  $[\text{mg}/\text{m}^3]$  zu bestimmen. Gravimetrische Staubmessungen werden mit dem Ziel der Bestimmung von Massenkonzentrationen des Feinstaubes sowie zur Ermittlung der Konzentration des Quarzfeinstaubes durchgeführt. Das Prinzip der Messung des A-Staubes basiert bei den gravimetrischen Verfahren auf dem Sammeln der alveolengängigen Staubfraktionen. Hierzu werden bzw. wurden in der deutschen Steinkohle die Messgeräte TBF50, MPGII und CIP10 verwendet. Bei dem tyndallometrischen Messverfahren wird die alveolengängige Staubfraktion gemessen, und zwar geschieht dies durch die Messung des Streulichtes, das bei unterschiedlichen A-Staub-Konzentrationen eine unterschiedliche Intensität aufweist. Anwendung finden dabei die Geräte TM digital  $\mu\text{P}$ , TM data und unter bestimmten Voraussetzungen das PARTIMEX.

Für die Auswertung der Staubkonzentrationverhältnisse im Windkanal wurden

die optischen Messgeräte TM digital  $\mu\text{P}$  und PARTIMEX verwendet. Von einer gravimetrischen Messung wurde auf Grund der langen Auswertungszeiten bei der Vielzahl an Messungen verzichtet.

## MPG II

Beim MPG II handelt es sich um ein gravimetrisches Staubmessgerät zur Probenahme von fraktioniert abgeschiedenen Feinstäuben. Seit seiner Zulassung im Jahre 1973 dient es seit mehr als 30 Jahren zur Bestimmung der Staubbelastung der Mitarbeiter in Bergbaubetrieben. Bei diesem Gerät wird der Grobstaub bereits in einem Vorabscheider (Horizontal-Elutriator) durch Sedimentation abgeschieden. Die alveolare Staubfraktion trifft im sogenannten Feinstaubfilterteil auf einen vertikal angeordneten Membranfilter und wird durch diesen aufgefangen. Nach der Abtrennung der Grobstaubanteile wird die Alveolarstaubfraktion derart abgeschieden, dass die Abscheidekurve des Gerätes der Johannesburger Konvention entspricht. In der Abbildung 5.7 ist das MPG II schematisch dargestellt. Durch einen mit Druckluft betriebenen Ejektor wird ein Ansaugvorgang erzeugt, der durch die Luftstrombegrenzungsdüse in einen konstanten Luftstrom ( $46\text{--}47,3\text{ l/min}$ ), je nach Kalibrierung des Gerätes, umgewandelt wird. Das Gerät besteht aus dem Ejektor und aus dem Staubmess- und Staubsammelgerät. Der Ejektor wird mit Druckluft betrieben und ist verantwortlich für die Erzeugung eines Unterdrucks. Ein Saugschlauch dient zur Verbindung von Ejektor und Ansaugstutzen. Der Ansaugstutzen des MPG II befindet sich hinter der Filterhalterung. Zwischen diesen beiden Elementen sitzt der Membranfilter. Die Filterhalterung und der Membranfilter stellen neben dem Plattenpaket, der Grenzmessdüse, der Luftumlenkscheibe, dem Luftverteiler und dem Unterdruckmesser die Bestandteile des eigentlichen Staubmess- und Sammelgerätes dar. Nachdem sich aus der im Plattenpaket laminar strömenden Luft der Grobstaub absetzen kann, strömt die feinstaubhaltige Luft durch die Luftstrombegrenzungsdüse und trifft nach dem Luftablenkkegel senkrecht auf den Membranfilter und wird dort abgeschieden. Ein Unterdruckmesser misst den Druck im Raum zwischen Filter und Luftstrombegrenzungsdüse und zeigt diesen an. Die vorgegebene Luftdurchgangsmenge ist gewährleistet, solange der angezeigte Unterdruck oberhalb des im Prüfbericht angegebenen Grenzwertes



- |        |   |        |                                      |
|--------|---|--------|--------------------------------------|
| Pos. 1 | Aufklappbarer Verschluss- und Tropfenwasserdeckel | Pos. 9 | Saugschlauch                         |
| " 2    | Horizontal-Elutriator                             | " 10   | Ejektor mit Schalldämpfer            |
| " 3    | Strömungsablenkplatte                             | " 11   | Ansaugstutzen für Saugschlauch       |
| " 4    | Luftstrombegrenzungsdüse                          | " 12   | Druckluftmesser                      |
| " 5    | Unterdruckmesser                                  | " 13   | Absperrventil                        |
| " 6    | Luftablenkkesel                                   | " 14   | Anschlußgewinde zur Druckluftleitung |
| " 7    | Membranfilterhalterung                            |        |                                      |
| " 8    | Ansaugstutzen für Saugschlauch zum Ejektor        |        |                                      |

Abbildung 5.7: Schematische Darstellung des MPG II.

liegt. In Abhängigkeit der Kornverteilung und des spezifischen Gewichts des in der Schwebe befindlichen Staubes können mit einem Membranfilter zwischen 40 und 100 mg Alveolarstaub gesammelt werden. Sollte ein Druckluftanschluss fehlen, kann das MPG II auch mit einer elektrisch betriebenen Vakuumpumpe eingesetzt werden. Der Betrieb dieser Ausführung ist jedoch nur auf nichtschlagwettergefährdete Betriebe beschränkt, da bisher keine vom Bergamt zugelassene schlagwettersichere Pumpe verfügbar ist.

### TM digital $\mu$ P

Das tragbare Staubmessgerät TM digital  $\mu$ P der Helmut Hund GmbH basiert auf dem Streulichtprinzip und dient zur Bestimmung von Staubkonzentrationen.

Hierzu fällt ein Primärlichtstrahl, der durch einen Infrarotsender erzeugt wird, in eine Messkammer. Wenn sich Staubpartikel in diesem Lichtstrahl befinden, rufen sie eine Streuung des Lichtes hervor, die dann mit dem Infrarotempfänger gemessen werden kann. (siehe Abbildung 5.8). Die Diode erzeugt ein mono-

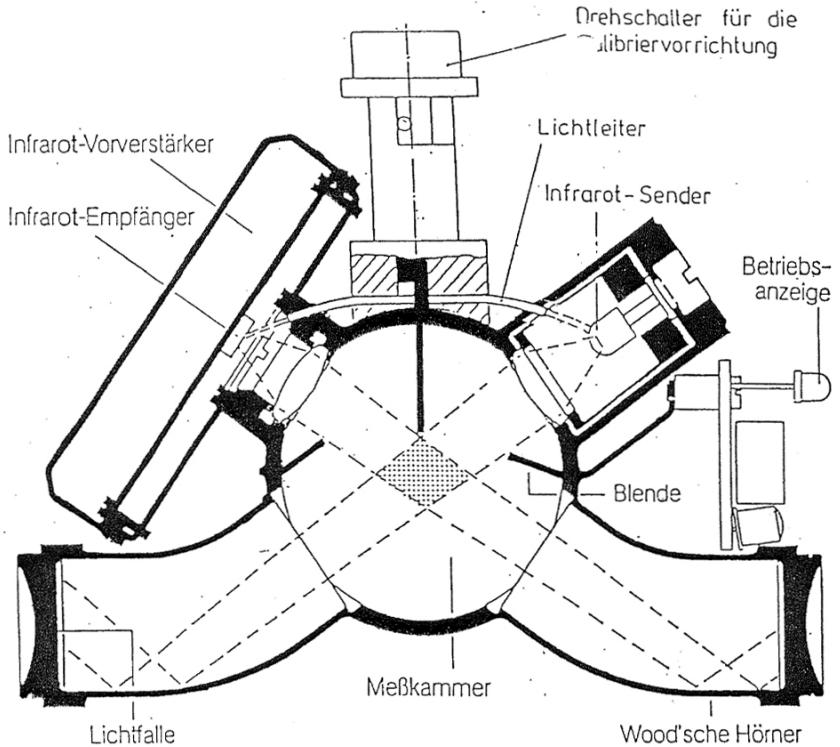


Abbildung 5.8: Messkammer TM digital µP.

chromatisches Licht mit einer Wellenlänge von 950 nm. Das Licht ist somit für das menschliche Auge nicht sichtbar. In Abhängigkeit der Messwellenlänge und des Streuwinkels lässt sich die alveolengängige Staubfraktion bestimmen. Der Vorteil liegt hierbei, dass kein Vorabscheider benötigt wird, da das Wirkungsprinzip eine Messung von Partikeln über 8 µm nicht mit einbezieht. Als

Ergebnis der Messungen erhält man einen Intensitätswert des Streulichtes ( $I_m$ ). Da sich dieser Wert proportional zur Staubkonzentration verhält, ist es möglich, durch Umrechnungsfaktoren den absoluten Konzentrationswert zu berechnen. Dazu müssen jedoch Vergleichsmessungen mit einem gravimetrischen Messgerät durchgeführt werden.

## PARTIMEX

Bei dem Partikelmessgerät PARTIMEX der Kirchgaesser Industrieelektronik GmbH handelt es sich um ein kontinuierlich messendes Gerät zur Bestimmung von Partikel- und Feinstaubkonzentrationen. Es besteht aus dem Messwertaufnehmer PARTIMEX-S und aus der Auswerteinheit PARTIMEX-A. Es wurde speziell für den Bergbau entwickelt und ist ein explosionsgeschütztes, robustes Gerät. Die Feinstaubkonzentration wird durch Messung des Streulichtes ermittelt, jedoch im Gegensatz zum TM digital  $\mu P$  mittels Laserdiode. Der Messwinkel und die Wellenlänge des Lichtes sind so gewählt, dass Partikel mit einer Korngröße kleiner als 5  $\mu m$  gemessen werden können. Das PARTIMEX Messgerät wird hauptsächlich in Abwetterstrecken eingesetzt, da es möglich ist, es durchlaufend zu betreiben. Der Vorteil dieses Gerätes liegt darin, dass es selbstreinigend ist und somit wenig Arbeitsaufwand benötigt. Der Reinluftfilter des Gerätes ist nur alle 1000 Betriebsstunden zu wechseln. Es ist darauf hinzuweisen, dass das PARTIMEX-Gerät lediglich zur Messung von Tendenzwerten eingesetzt werden darf. Auf Grund der Möglichkeit, dieses Gerät dauerhaft zu betreiben, ist es in der Lage, die gesamte Staubentwicklung der Grube aufzuzeigen. Eventuelle Änderungen in der Feinstaubkonzentration lassen sich somit direkt erkennen. Weiterhin ist es auch möglich, zu späteren Zeitpunkten Rückschlüsse für bestimmte Geschehen zu ziehen, in denen die Messwerte erhöht waren. Durch die direkten Messergebnisse ist es ebenso möglich, bei Änderungen der Konzentration sofortige Gegenmaßnahmen einzuleiten. Auf Grund der einfachen Handhabung, des geringen Wartungsaufwands, der Selbstreinigung und der sofortigen Auswertung der Messergebnisse wurde das PARTIMEX für die Vergleichsversuche verwendet. Die Installation des PARTIMEX an der Staubmessstelle des Windkanals ist in Abbildung 5.9 zu sehen.



Abbildung 5.9: PARTIMEX Staubmessstelle.

### 5.2.3 Bedüsung

Zu den erforderlichen Betriebsdaten der Düsen gehören Wasserdruck, -volumenstrom und -temperatur. An der Regeltafel, Abbildung 5.10, wird der Betriebsdruck der Düse an dem Ventil eingestellt. In der Düsenwasserleitung fließt das Wasser durch einen Turbinen-Durchflussmessgeber, der den Volumenstrom in l/min angibt. In der Düsenhalterung sind ein Druckmesssensor und ein Thermoelement eingebaut, welche die Wassereigenschaften direkt am Düsenaustritt messen.

### 5.2.4 Datenverwaltung

Alle im Windkanal integrierten Messgeräte sind über ein Signalerfassungsgerät mit dem Messrechner verbunden. Die Daten werden gemeinsam in eine Daten-

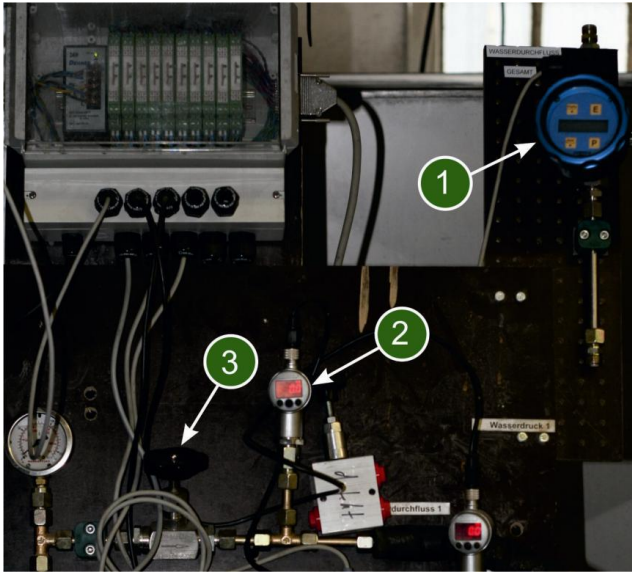


Abbildung 5.10: Regulierung des Wasserstroms.

bank geschrieben. Für jede Sekunde Messzeit werden die einzelnen Messsignale von dem Programm DasyLab (Data Acquisition System Laboratory) ausgewertet, gemittelt und gespeichert. Hierdurch ist eine genaue Aufnahme des gesamten Versuches möglich, bei der die einzelnen Messwerte miteinander verglichen werden können.





## 6 Entwicklung der Düsentechnik

Bei den Grundlagen der Düsentechnik in Kapitel 4 wurden die konstruktiven Eigenschaften und die daraus resultierenden Sprühcharakteristika beschrieben. Entwicklungen in der Düsentechnik zielen auf die Steuerung dieser einzelnen Charakteristika, um bestimmte Zwecke zu erfüllen. Bei der technischen Staubbekämpfung liegen diese Ziele, wie in Kapitel 3 beschrieben, in der Minimierung der Staubentstehung und in der Staubbiederschlagung aus der Luft. Hierzu müssen die äußeren Einflüsse auf die produzierten Tropfen genau betrachtet werden.

### 6.1 Einflussfaktoren

Die äußeren Einflüsse sind stark von den Einsatzorten der Düsen abhängig. Zu den Einflussgrößen gehören die klimatischen und wettertechnischen Bedingungen sowie die geometrischen Gegebenheiten. Das Klima unter Tage kann die Wassertropfen durch die Wärmeübertragung verändern, welches dazu führen kann, dass die Tropfen sich bezüglich der Temperatur und der Größe verändern können. Dies ist eine gegenseitige Beziehung, wobei die Einflüsse der Tropfen auf das Klima eine größere Bedeutung haben können. Werden die Wettergeschwindigkeiten betrachtet, wird ihre Bedeutung klar. Die Wetter können nicht nur Staub, sondern auch Tropfen mit sich tragen. Genau wie bei den Stäuben sinken die größeren, schweren Tropfen schnell aus der Luft ab und die kleineren bleiben länger in der Schwebe. Der Unterschied im Verhalten der Schwebeteile liegt in der Möglichkeit der Verdampfung der Tropfen. Unter den geometrischen Einflüssen werden die Dimensionen der Umgebungen verwendet, bei der sowohl die Entfernung zwischen Düsenöffnung und Tropfenziel als auch die Größe der Eingriffsfläche wichtig sind.

Die Sprühcharakteristika können durch die betrieblichen Einstellungen gesteu-

ert werden, wobei der Betriebsdruck die größte Stellschraube der Düse darstellt. Dadurch kann der Volumenstrom, die Sprühweite und der Tropfendurchmesser beeinflusst werden.

## 6.2 Tropfendurchmesser

Die Größe der Tropfen und damit ihre Durchmesser fallen bei der Betrachtung der Sprühstrahlen als erstes auf. Die Bestimmung des Durchmessers eines einzelnen Tropfens ist nicht schwierig, jedoch ist die Bestimmung des Durchmessers eines Tropfenkollektives, wie in dem Sprühbild einer Düse, deutlich anspruchsvoller. Um ein Kollektiv zu messen, wurde das Laserbeugungsgerät HELOS VARIO-/KF der Sympatec GmbH verwendet. Dieses Messgerät arbeitet nach der ISO 13320 für die Bestimmung von Partikelgrößenverteilungen. Das Messprinzip ist in Abbildung 6.1 dargestellt. Bei dem Laserbeugungsspektrometer

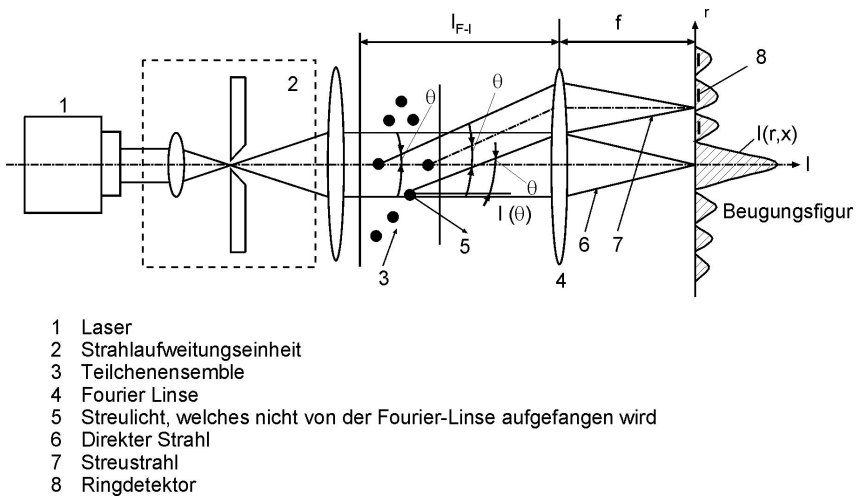


Abbildung 6.1: Schematische Darstellung eines Laserbeugungsgerätes [2].

wird einen HeNe-Laser mit einer Wellenlänge von 632.8 nm, mit einem langen Resonator und mit einem räumlichen Filter in der Strahlaufweitereinheit genutzt, um einen monochromaten, kohärenten und parallelen Lichtstrahl zur

Beleuchtung der Partikel zu erzeugen. Die Tropfen passieren den Laserstrahl innerhalb der Arbeitsdistanz der Linse im Bereich des parallelen Lichtstrahls. Der Vorteil dieser konventionellen Anordnung besteht dabei in der flexiblen Weglänge zwischen der Messzone und dem Detektor. Durch die Interaktion zwischen dem einfallenden Lichtstrahl und den Tropfen ergeben sich Streubilder mit unterschiedlichen Lichtintensitäten und Streuwinkeln. Die gesamte winkelabhängige Intensitätsverteilung, bestehend aus dem direkten, ungehinderten Lichtstrahl und dem gestreuten Lichtstrahl, wird anschließend durch die Fourierlinse auf den Detektor fokussiert. Die Linse sorgt für ein Streubild, welches unabhängig von der jeweiligen Position des Tropfens im Lichtstrahl ist, so dass die zuvor winkelabhängige Intensitätsverteilung in eine diskrete, räumliche Intensitätsverteilung umgewandelt wird. Der aufnehmende Detektor besteht aus 31 Photoelementen, die ringförmig angeordnet sind. Die Photodioden wandeln die zuvor räumlichen Intensitätsverteilungen in Photoströme um, die anschließend von der Elektronik konvertiert und zu einer Anzahl von Intensitätsvektoren digitalisiert werden, welche das Streubild repräsentieren. Das zentrale Detektorelement kann durch eine axiale Bewegung automatisch zentriert und fokussiert werden. Die Signale aus den Intensitätsverteilungen werden von einem Rechner, durch entsprechende mathematische Algorithmen, in eine Tropfengrößenverteilung mit 31 Klassen umgerechnet. Abbildung 6.2 zeigt den

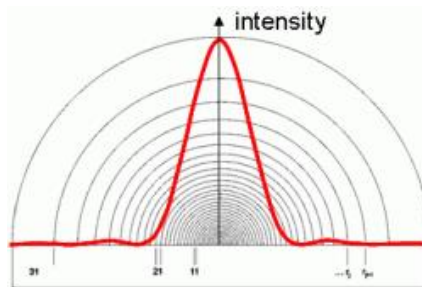


Abbildung 6.2: Multielementdetektor.

Aufbau des Multielementdetektors mit seinen 31 Photoelementen und der theoretischen Intensitätsverteilung, die von einem einzelnen Tropfen erzeugt wurde.

Die ringförmigen Photoelemente werden mit wachsender Entfernung vom Mittelpunkt exponentiell größer, was mit dem, von kleinen und großen Partikeln erzeugten, Beugungswinkeln und der Intensität ihrer Verteilungen abhängt. Dies spiegelt sich in der Darstellung der Messergebnisse mit ihren 31 Klassengrenzen wieder.

Als Berechnungsgrundlage wird die Fraunhofer-Theorie für das Streubild verwendet. Diese vernachlässigt die Einflüsse aus der Brechung und der Absorption, welche nur bei sehr geringen Partikelgrößen zu erkennen sind und über entsprechende Mie-Faktoren, Stoffparameter, einbezogen werden können. Die Fraunhofer-Theorie bezieht sich auf die Beugung, wie in Abbildung 6.3 zu sehen ist. Die Integration des Laserbeugungsgerätes in dem Windkanal erfolgte,

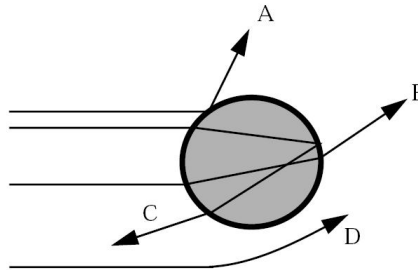


Abbildung 6.3: Streuung von Licht: Reflektierung (A), Brechung (B), Brechung und interne Reflektierung (C), und Beugung (D) [51].

um möglichst viele Messpunkte zu ermöglichen. Der HELOS/VARIO wurde auf einem festen Rahmen montiert, welcher eine Bewegung des Gerätes ohne eine Störung der Ausrichtung des Lasers ermöglicht. Dieser Rahmen sitzt wiederum mit Rollen auf einer Schiene, die den gesamten Messbereich des Kanals einschließt. Durch die Montage mehrerer Schienen wird auch die Höhenverschiebung gewährleistet. Dieser Aufbau ermöglicht den Einsatz des Laserbeugungsgerätes an kritischen Stellen entlang des Windkanals. Die Messpunkte haben einen Abstand von einem Meter auf die Länge des Kanals mit jeweils 4 Höhenpositionen. Abbildung 6.4 zeigt die Integration des Messgerätes auf dem rotgestrichenen Rahmen.

Bei einem Teil der Messungen ist die Messtechnik der Laserbeugung an ih-

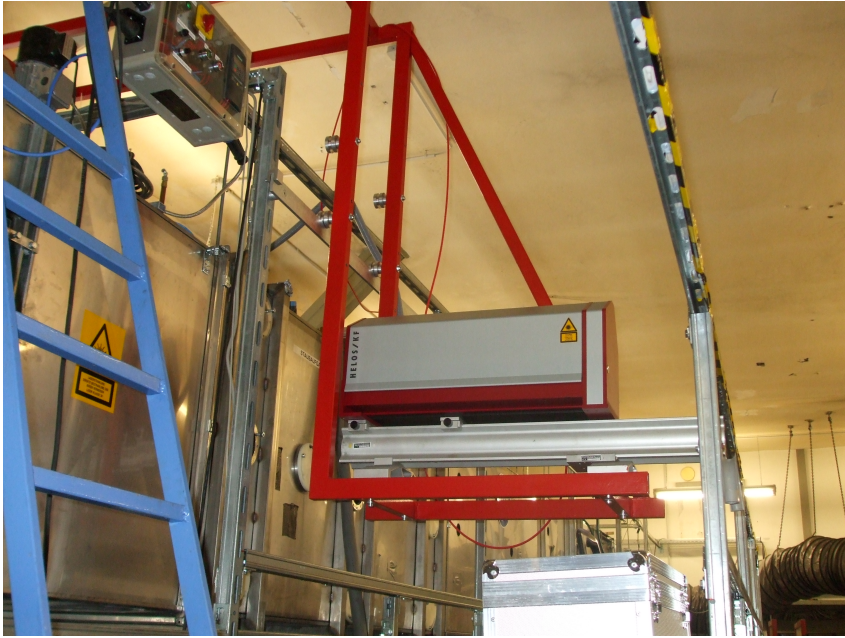


Abbildung 6.4: Integration der Tropfengrößenanalyse im Windkanal.

re technischen Grenzen gestoßen. Bei der Laserbeugung kann eine bemerkbare Mehrfachstreuung auftreten ab einer optischen Konzentration von ca. 60 %, da das von einem Tropfen gebeugte Licht von weiteren Tropfen zusätzlich gebeugt wird [30]. Dies führt dazu, dass bei steigender Tropfenkonzentration im Messbereich die gemessene Tropfengröße im Verhältnis zur tatsächlichen Tropfengröße sinkt [35]. Zu der Kalibrierung von Laserbeugungsgeräten bei dichten Sprühstrahlen wurden die Zusammenhänge von Dodge [29] beschrieben,

$$SMD_0 = \frac{SMD_m}{CF} \quad (6.1)$$

bei der ein Korrekturfaktor,  $CF$ , das Verhältnis zwischen dem gemessenen,  $SMD_m$ , und dem tatsächlichen Sauterdurchmesser,  $SMD_0$ , beschreibt. Der Korrekturfaktor ist somit von der Tropfengröße und der Transmission ( $T$ ), dem

Reziproken von der optischen Konzentration, abhängig.

$$CF = 1 - ae^{-bT}e^{-cSMD_0} \quad (6.2)$$

Dazu werden empirisch ermittelte Parameter für den Korrekturfaktor des Sauterdurchmessers verwendet.

- a - 0,9456
- b - 3,811
- c - 0,0204

Die Abhängigkeit des Sauterdurchmessers von der optischen Konzentration ist in Abbildung 6.5 dargestellt. Der Korrekturfaktor hat einen größeren Einfluss

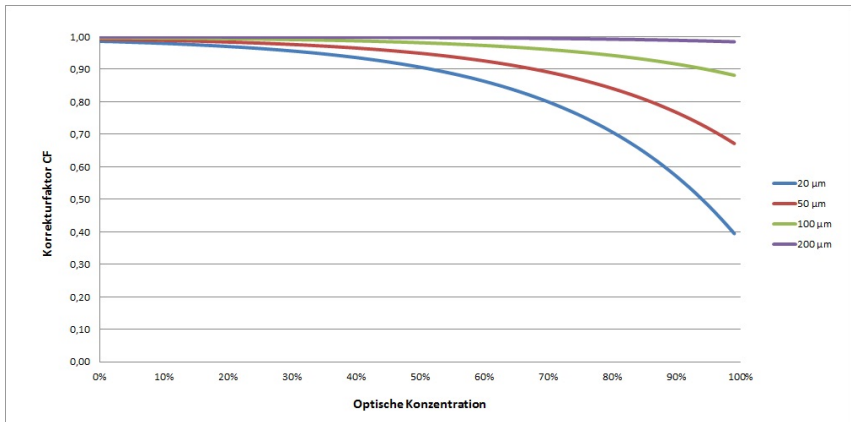


Abbildung 6.5: Korrekturfaktor für den Sauterdurchmesser.

mit sinkenden Tropfengrößen und steigenden optischen Konzentrationen. Bei sehr feinen Tropfen in hoher Konzentration muss eine Korrektur des Sauterdurchmessers erfolgen, da der Durchmesser bis zu 60 % von dem tatsächlichen Wert abweichen kann.

### 6.3 Staubbiederschlagung

Die Staubbiedeeffektivität eines Tropfens ist von vielen Faktoren abhängig, welche die Wahrscheinlichkeit eines Aufeinandertreffens von Staubpartikeln und Wassertropfen beeinflussen. Die Staubbiedeeffektivität von Wasserdüsen verbessert sich mit steigender Relativgeschwindigkeit zwischen Staubpartikel und Wassertropfen, mit steigendem Durchmesser und Dichte der Staubpartikel und mit kleiner werdenden Wassertropfen [63]. Abbildung 6.6 zeigt, wie Staubpartikel einen Tropfen umströmen. Durch die dargestellten geometrischen Verhält-

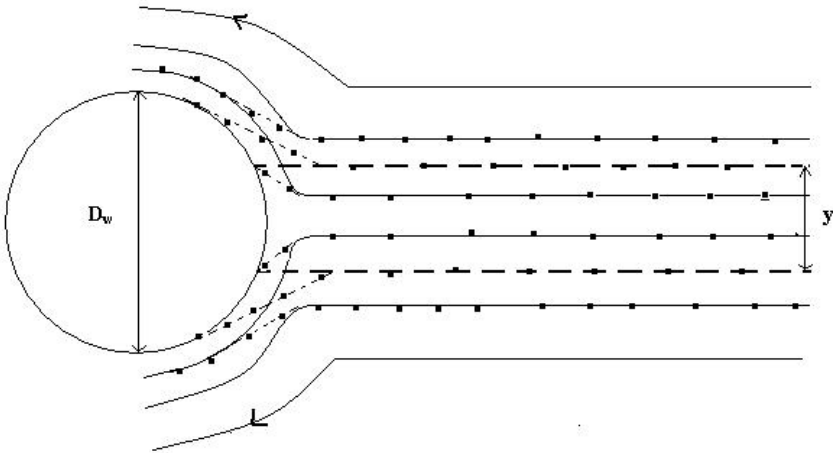


Abbildung 6.6: Staubbiedeströmung eines Tropfens.

nisse kann die Staubbiedeeffektivität ( $E$ ) eines einzelnen Tropfens berechnet werden.

$$E = \frac{y^2}{D_w^2} \quad (6.3)$$

Eine genaue Bestimmung des Strömungsverhältnisses zwischen den Tropfen und den Staubpartikeln zueinander ist schwierig und braucht deswegen folgende em-

pische Näherung.

$$E = 0,266 \ln(K) + 0,59 \quad (6.4)$$

Der Faktor  $K$  ergibt sich aus den Betriebsgrößen.

$$K = \frac{u_r \rho D_p^2}{9 \mu D_w} \quad (6.5)$$

Bei dieser Formel werden folgende Betriebsgrößen benötigt:

- $D_p$  - Durchmesser des Staubpartikels [m]
- $D_w$  - Durchmesser des Wassertropfens [m]
- $u_r$  - relative Geschwindigkeit zwischen Partikel und Tropfen [m/s]
- $\rho$  - Partikeldichte [kg/m<sup>3</sup>]
- $\mu$  - kinematische Viskosität der Luft [Ns/m<sup>2</sup>]

Mit der Effizienz eines einzelnen Tropfens kann die Gesamtstaubbindeeffektivität eines Sprühstrahls errechnet werden.

$$\eta_p = 1 - e^{-\frac{3EW}{2D_w Q} L} \quad (6.6)$$

mit:

- $W$  - Volumenstrom des Wassers [m<sup>3</sup>/min]
- $Q$  - Volumenstrom der Luft [m<sup>3</sup>/min]
- $L$  - Länge der Bewegung von Tropfen und Staubpartikeln [m]

Hierbei wird die relative Geschwindigkeit der Tropfen und der Staubpartikel zueinander durch die Vektorrechnung abgeschätzt. Dessen Interaktionslänge wird auch durch die Geometrie des Staubkanals eingeschränkt. Als Durchmesser wird für die Staubpartikel nicht der tatsächliche Durchmesser des Staubs, sondern der Durchmesser, welcher vom Messgerät erfasst wird, angesetzt. Wie in Kapitel 4 erläutert, wird der Sauterdurchmesser als der repräsentative Tropfendurchmesser gewählt. Dadurch wird eine exakte theoretische Betrachtung der Effektivität einer Düse sehr schwierig und eine experimentelle Ermittlung notwendig.



### 6.3.1 Versuchsdurchföhrung

Für eine Reihe unterschiedlicher Düsen wurde das Staubbinderhalten ermittelt. Für jede Düse wurde eine kontrollierte Staubmenge in den Windkanal eingblasen, die dann von den erzeugten Tropfen versucht wird niederzuschlagen. Die resultierende Staubkonzentration im Kanal wurde dann gemessen und verglichen. Der Prüfstand, siehe Kapitel 5, wurde für die Staubkonzentrationsmessungen verwendet. Der Staub wurde kontrolliert mit einer Zuföhrung von dem Schneekendosierer bei einer Schneekendrehzahl von 10 Hz eingblasen, das heißt eine Staubzuföhrung von ca. 15 g/min. In den Staubuntersuchungen, siehe Kapitel 5, wurde die Partikelgrößenverteilung des Prüfstaubes gezeigt. Kombiniert mit der Förderrate und den Wettergeschwindigkeiten im Windkanal kann die Gesamtstaub-, E-Staub und A-Staubkonzentration errechnet werden, siehe Tabelle 6.1. Der Windkanal wurde für diese Versuche bei Umgebungstemperatur mit einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s betrieben.

Tabelle 6.1: Staubkonzentrationen des Schieferstaubs im Windkanal bei 3 m/s.

<b>Gesamtstaub</b>	<b>A-Staub &lt; 10 µm</b>	<b>E-Staub &lt; 100 µm</b>
83,3 mg/m <sup>3</sup>	28,6 mg/m <sup>3</sup>	61,3 mg/m <sup>3</sup>

In dem Versuch wurden Vollkegelstrahldüsen, Hohlkegeldüsen und pneumatischer Zerstäuber miteinander verglichen. Die Einstoffdruckdüsen wurden mit 15 bar Wasserdruck betrieben. Dieser Druck wird häufig unter Tage bei der Gewinnungsfeld-, Brecher- und Übergabenbedüsung verwendet. Jede Düse wurde einzeln eingestellt und zusätzlich der Volumenstrom ermittelt. Die Tropfengröße, als Sauterdurchmesser der Tropfengrößenverteilung in der Messzone angegeben, wurde für jede Düse gemessen.

### 6.3.2 Ergebnisse und Diskussion

Aus diesen Versuchen wurde für jede Düse das Staubbindervermögen ermittelt. Als Ergebnis wurde die Staubkonzentration in der Luft mit und ohne einer Bedüsungseinrichtung gemessen. Aus der Differenz konnte dann die Effektivität der Düse ermittelt werden. Um die Messwerte miteinander zu vergleichen,

wurde der Sauterdurchmesser als Bezugsgröße wie üblich bei strömungstechnischen Problemstellungen gewählt. Die ersten Ergebnisse aus diesem Versuch sind in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Einstoffdüsen wurden mit 15 bar Wasserdruck betrieben, und wiesen Durchflussmengen zwischen 0,6 und 6,3 l/min auf. Die Partikelgrößenverteilungen variierten entsprechend, so dass deutlich Unterschiede zu erkennen sind, auch wenn diese große Überschneidungen in ihrer Verteilungsbreite aufweisen. Damit konnte die Effektivität der Staubbienerschlagung in Abhängigkeit der Tropfengröße annähernd ermittelt werden. Aus der Darstellung ist keine Abhängigkeit erkennbar, da sie in keinsten Weise

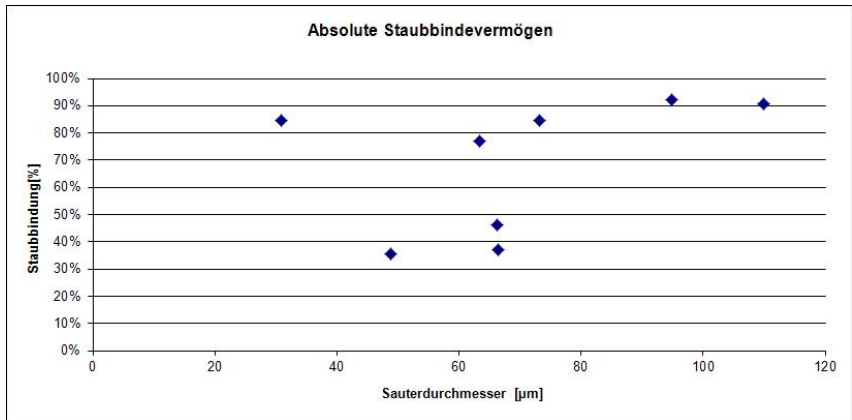


Abbildung 6.7: Absolutes Staubbindingvermögen bezogen auf den Sauterdurchmesser.

die Anzahl der Tropfen oder den Volumenstrom des Wassers durch die Düse berücksichtigt. Bei den erzielten Staubkonzentrationen der technischen Staubbekämpfungsmaßnahmen in der Literatur wird meist eine Betrachtungsweise verwendet, in der nur die gemessenen Staubkonzentrationen verglichen werden und vernachlässigt eine Analyse der Wassermengen. Wird die Effektivität durch den Volumenstrom geteilt, erhält man einen normierten Wert, der einen Vergleich der Düsen miteinander ermöglicht, siehe Abbildung 6.8. Die Abhängigkeit der Staubbindingeffektivität von der Tropfengröße ist klar erkennbar. Kleinere Tropfen können Feinstäube in der Luft besser binden als grobe. Werden die zwei

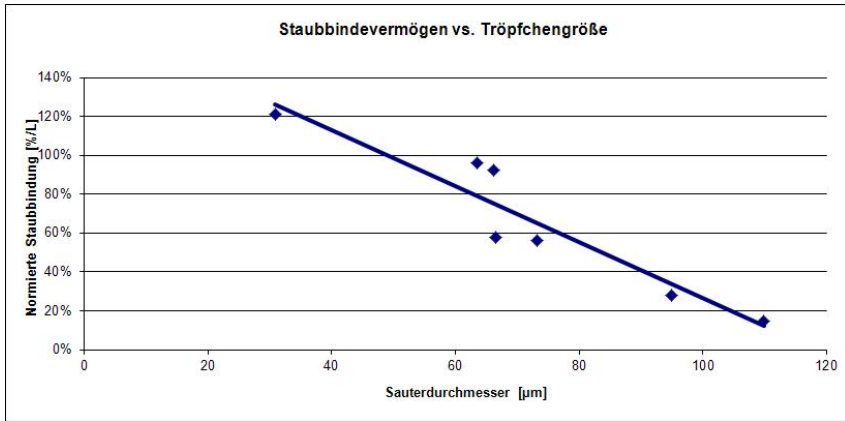


Abbildung 6.8: Staubbindervermögen bezogen auf den Sauterdurchmesser auf den Volumenstrom normiert.

äußeren Messpunkte als Beispiel herangezogen, werden diese Größenordnungen verständlicher. Um den gleichen Anteil an Staub zu binden, verbrauchen die untersuchten Düsen zwischen 0,7 l/min (Zweistoffdüse) und 6,3 l/min (Vollkegelstrahldüse). Hieraus wird das Wassereinsparpotenzial durch fein zerstäubende Düsen eindeutig ersichtlich. Bei einer reinen Betrachtung der Tropfengröße, kann durch die Wahl der Düse mit 5,6 l/min (90 %) weniger Wasser die gleiche Menge an Staub aus der Luft niedergeschlagen werden.

Dieses Verhältnis kann voll ausgenutzt werden, so lange die Gegebenheiten denen des Prüfstandes ähneln. Ist dies nicht der Fall, so ist eine negative Abweichung von den dargestellten Werten zu erwarten. Der Windkanal stellt optimale Bedingungen für die Staubbiederschlagung dar, in der ein abgeschlossener und kontrollierter Wetterstrom mit Staub beaufschlagt wird und dieser durch den Sprühstrahl der Düse gezwungen wird ohne Ausweichmöglichkeit. Die tatsächlichen Verhältnisse unter Tage weichen von denen im Windkanal ab in Bezug auf die Wetterführung und zusätzliche Störfaktoren.

## 6.4 Driftverhalten

Bei den vorherigen Versuchen war ersichtlich, dass die Tropfen sich unterschiedlich im Windkanal bei höheren Wettergeschwindigkeiten verhalten. Dieser potenzielle Störfaktor musste weiter untersucht werden, um sicher zu stellen, dass die erzeugten Tropfen nicht von ihrer Flugbahn zu weit abgelenkt werden, um sicher ihr Ziel zu erreichen. Das Driftverhalten beschreibt die Mitnahme von Tropfen durch den Wetterstrom. Sie zeichnet sich dadurch aus, dass kleinere Tropfen bzw. Tropfen mit geringerer Energie einfacher abgelenkt werden. Dieses Verhalten wird beobachtet, wenn bei sonst gleichbleibenden Parametern die Wettergeschwindigkeit verändert wird. Dazu wurde das Laserbeugungsgerät unterhalb der Düsenöffnung am Windkanal integriert, um das Verhalten des Tropfenspektrums bei unterschiedlichen Wettergeschwindigkeiten zu untersuchen.

### 6.4.1 Versuchsdurchführung

Um das Driftverhalten der Tropfen bei unterschiedlichen Wettergeschwindigkeiten zu ermitteln, wurde das Laserbeugungsgerät verwendet, damit die Veränderungen der Tropfengröße und der Konzentration im Sprühstrahl aufgenommen werden konnte. Die Messung wurde für jede Versuchseinstellung mittig im Kanal, direkt unterhalb der Düsenöffnung und 40 cm abwetterseitig versetzt, durchgeführt. Damit sollte ersichtlich werden, durch die Zu- oder Abnahme des Tropfenspektrums, welche Tropfen unter welchen Bedingungen mitgetragen werden. Zum Vergleich wurden Wettergeschwindigkeiten von 0, 1, 3 und 6 m/s simuliert. Veränderungen in den Dichteverteilungskurven zeigen am deutlichsten, welche Tropfenfraktion sich verändert hat. Die optische Konzentration gibt eine Auskunft darüber, wie viele Tropfen sich im Messbereich befinden.

### 6.4.2 Ergebnisse und Diskussion

Parallel zur Staubbiederschlagung wurde für dieselben Einstoffdruckdüsen das Driftverhalten ermittelt. Direkt unterhalb der Düse konnte für nur zwei der Düsen Messwerte aufgenommen werden, da die Tropfen von den anderen Düsen so klein waren, dass sie sehr schnell von der Luft mitgenommen wurden. Tabelle 6.2 zeigt die Sauterdurchmesser der Tropfenverteilung und die dazugehörigen

optischen Konzentrationen bei den Wettergeschwindigkeiten 0, 1, und 3 m/s für die Messzone, die 40 cm abwetterseitig versetzt war.

Tabelle 6.2: Driftverhalten der Düsen bei 0, 1 und 3 m/s.

Düse	SMD 0 m/s	C.opt 0 m/s	SMD 1 m/s	C.opt 1 m/s	SMD 3 m/s	C.opt 3 m/s
400.393.16.01	88 $\mu\text{m}$	78 %	113 $\mu\text{m}$	68 %	196 $\mu\text{m}$	28 %
400.240.16.01	79 $\mu\text{m}$	74 %			194 $\mu\text{m}$	18 %
200.140.16.06			70 $\mu\text{m}$	45 %	132 $\mu\text{m}$	16 %
200.140.16.04	63 $\mu\text{m}$	47 %	87 $\mu\text{m}$	40 %	132 $\mu\text{m}$	10 %
200.140.16.10	57 $\mu\text{m}$	38 %	115 $\mu\text{m}$	7 %	140 $\mu\text{m}$	1 %
200.140.16.12	62 $\mu\text{m}$	54 %	113 $\mu\text{m}$	23 %	138 $\mu\text{m}$	5 %
212.28517AC000	69 $\mu\text{m}$	62 %	125 $\mu\text{m}$	25 %	144 $\mu\text{m}$	5 %

Aus Tabelle 6.2 ist ersichtlich, wie die Tropfengrößen kontinuierlich mit steigender Wettergeschwindigkeit größer werden. Der Grund ist auf die Mitnahme der kleinen Tropfen zurückzuführen, die dann nicht von dem Messgerät aufgenommen werden. Gleichzeitig sinkt die optische Konzentration, was auf eine geringere Anzahl von Tropfen hindeutet. Düsen mit ähnlichen Sauterdurchmessern können unterschiedliche Driftverhalten zeigen, da die Tropfenverteilung alleine mit dem Sauterdurchmesser nicht hierfür ausreichend beschrieben wird. Das Verhältnis zwischen den groben und feinen Tropfen geht dabei verloren. Dieses Verhältnis ist für das Driftverhalten entscheidend.

Die optische Konzentration gibt das Verhältnis des abgeschwächten Lichts durch die Tropfen im Laserstrahl an. Sie wird aus den Signalstärken der zentralen Detektorelemente ermittelt und ist nur ein Wert der Lichtstärke. Der Intensitätsverlust des Lichts steht im Verhältnis zur Volumenkonzentration des durchleuchteten Messbereichs und wird durch das Lambert-Beer'sche Gesetz beschrieben. In Abbildung 6.9 ist die Schwächung der Strahlungsintensität nach diesem Prinzip zu sehen.

$$C_{\text{opt}} = \frac{I_0 - I_1}{I_0} \quad (6.7)$$

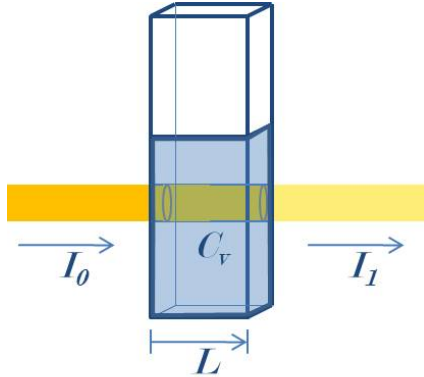


Abbildung 6.9: Lambert-Beer'sche Gesetz.

Mit dem Lambert-Beer'sche Gesetz kann die Volumenkonzentration ( $C_v$ ) aus der optischen Konzentration ( $C_{\text{opt}}$ ) berechnet werden [85]:

$$C_{\text{opt}} = 1 - e^{-C_v \cdot A_v \cdot L} \quad (6.8)$$

mit  $L$ , die Länge der Messzone, und  $A_v$ , der volumenbezogene Streuungsbereich, wobei  $A_v$  als:

$$A_v = \frac{3}{2} \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} K(x) \cdot x^{-1} \cdot q_3(x) \, dx \quad (6.9)$$

definiert wird mit  $K(x)$  als Extinktionsfunktion und  $q_3(x)$  als Volumenverteilungsdichte. Laut Herstellerangaben kann für die Sympatec HELOS Geräte die Extinktionsfunktion näherungsweise als Konstante mit dem Wert 2 angenommen werden. Aus der Tropfengrößenverteilung kann der vollständige -1. Moment der Volumenverteilungsdichte errechnet werden [9].

$$M_{(-1,3)} = \int_{x_{\min}}^{x_{\max}} x^{-1} \cdot q_3(x) \, dx \quad (6.10)$$

Dadurch ergibt sich:

$$A_v = 3 \cdot M_{(-1,3)} \quad (6.11)$$

Somit kann die Volumenkonzentration aus der optischen Konzentration und dem Moment der  $-1.$  Ordnung errechnet werden.

$$C_v = -3 \cdot M_{(-1,3)} \cdot L \cdot \ln(1 - C_{\text{opt}}) \quad (6.12)$$

Wird diese Berechnung durchgeführt, können auch die Veränderungen bei der Volumenkonzentration der Tropfen in Tabelle 6.3 verglichen werden. Die Volu-

Tabelle 6.3: Driftverhalten der Düsen bei 0, 1 und 3 m/s.

Düse	Volumenstrom	Vol.Konz. 0 m/s	Vol.Konz. 1 m/s	Vol.Konz. 3 m/s
400.393.16.01	6,2 l/min	0,0450	0,0436	0,0213
400.240.16.01	3,3 l/min	0,0361	0,0154	0,0127
200.140.16.06	1,5 l/min		0,0142	0,0077
200.140.16.04	0,8 l/min	0,0133	0,0150	0,0046
200.140.16.10	0,1 l/min	0,0094	0,0028	0,0005
200.140.16.12	0,5 l/min	0,0163	0,0099	0,0023
212.28517AC000	0,7 l/min	0,0223	0,0112	0,0023

menkonzentration in der Messzone ist in  $l/m^3$  angegeben. Düse 400.393.16.01 ist eine Vollkegelstrahldüse mit einem Volumenstrom von 5 l/min bei 5 bar und ist für die Gewinnungsfeldbedüsung gedacht. Aus dieser Messreihe weist sie die größten Tropfen aller Düsen auf. Bei einer Wettergeschwindigkeit von 1 m/s werden nur 3 % der Tropfen verdrängt. Wird die Wettergeschwindigkeit auf 3 m/s erhöht, werden 53 % der Tropfen von dem Wetterstrom mitgenommen. Bei den Düsen mit kleineren Tropfen wird schon bei einer Wettergeschwindigkeit von 1 m/s ein Großteil der Tropfen mitgetragen. Bei der Düse mit der feinsten Zerstäubung sind bei der höchsten Wettergeschwindigkeit kaum noch Tropfen zu erkennen, sie werden sofort nach dem Austritt aus den Düsen von dem Wetterstrom erfasst. Diese Analyse bietet die Grundlage für die weitere Analyse von Düsen, die in Bereichen eingesetzt werden, in denen höhere Wettergeschwindigkeiten vorherrschen.





## 7 Analyse der einzelnen Staubquellen

### 7.1 Gewinnungsfeld

Bei der Gewinnungsfeldbedüsung werden Düsen an der Kappenspitze der Ausbauschilde angebracht, wie in Abbildung 7.1 dargestellt ist. Hier werden Düsen unterschiedlichster Bauart und Sprühwinkel verwendet, speziell Flachstrahldüsen und Vollkegelstrahldüsen kommen zum Einsatz. Die verschiedenen Düsen werden den Gegebenheiten im Gewinnungsfeld entsprechend angepasst, d. h. der Volumenstrom, der Druck und die Anzahl der Düsen geregelt. In der Regel wird bei der Gewinnungsfeldbedüsung ein Betriebsdruck von 15 bar verwendet, wobei es aber auch Ausnahmen mit höheren Drücken gibt. Die Nenndurchflüsse befinden sich im Bereich von 2,5 bis 9 l/min bei einem Betriebsdruck von 5 bar. Ziel dieser Düsen ist es, den Kohlenstoß zu benetzen und gleichzeitig einen Teil

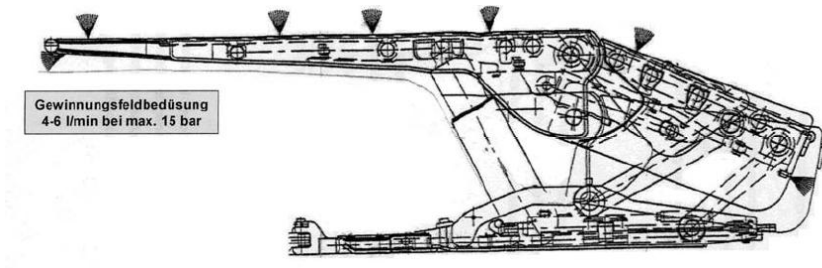


Abbildung 7.1: Gewinnungsfeldbedüsung.

des schwebenden Staubes niederzuschlagen. Die Entfernung von der Kappenspitze bis zum Kohlenstoß ist geringer als zwei Meter, wobei auch der gesamte Kohlenstoß benetzt werden soll. Im Streb können höhere Wettergeschwindigkeiten als in der Strecke auftreten, mit dem Ergebnis, dass Wassertropfen von den Wettern mitgetragen werden. Durch diese Bedüsung werden die Bergleute

vor Ort am meisten belästigt. Das Bedüsungswasser am Kohlenstoß findet dann seinen Weg mit der Kohle bis zur Förderung.

### **7.1.1 Einflussbedingungen**

Die Verhältnisse im Streb sind von den Wetterern abhängig, dazu gehören der Volumenstrom und die Wettergeschwindigkeit sowie die klimatechnischen Bedingungen der Wetter. Zum Einen beeinflussen die Frischwetter direkt die Staubkonzentration im Streb in Bezug auf die Verdünnungen der Wetter und zum Zweiten können die Wetter nicht nur die Staubpartikel sondern auch die Tropfen der Bedüsungseinrichtungen am Gewinnungsgerät und der Gewinnungsfeldbedüsung mit sich tragen.

Die Entfernung von der Kappenspitze bis zum Kohlenstoß variiert je nach Position der Ausbauschilde. Sie ist aber in der Regel erheblich geringer als zwei Meter. Dabei gilt es den gesamten Stoß zu benetzen. Die zu benetzende Fläche hängt dann von der Flözmächtigkeit ab. Im Streb können deutlich höhere Wettergeschwindigkeiten als in der Strecke auftreten. Hier sind meistens Wettergeschwindigkeiten bis zu 3 m/s zu erwarten, je nach Betriebsbedingungen können auch Wettergeschwindigkeiten bis zu 6 m/s auftreten. Der Teil vom Bedüsungsstrahl, der den Kohlenstoß nicht erreicht, kann von den Wetterern mitgeführt werden und die Bergleute vor Ort belästigen. Das Bedüsungswasser des Gewinnungsfeldes findet dann seinen Weg mit der Kohle in die Förderung.

### **7.1.2 Erforderliche Düseneigenschaften**

Um den gesamten Kohlenstoß zu benetzen, muss eine Düse verwendet werden, deren Sprühbreite bei dem entsprechenden Abstand zum Kohlenstoß ausreichend breit ist. Diese erforderliche Sprühbreite ist meist ca. 2 m bei einer Sprühweite von ca. 1,5 m. Um die Mitnahme der Tropfen durch die Wetter zu verhindern, müssen relativ grobe Tropfen erzeugt werden. Sie müssen eine ausreichende Energie aufweisen, um den Stoß zu erreichen. Hierfür können entweder Vollkegelstrahldüsen oder Flachstrahldüsen mit einem breiten Ausgang in der Düsengeometrie verwendet werden. Folgende Kriterien beschreiben die Eignung einer Düse für die Gewinnungsfeldbedüsung:

- Volumenstrom: Genügend Wasser muss über die Dauer des Sprühvorgangs austreten, um den Kohlenstoß ausreichend zu benetzen.
- Sprühbreite: Der Sprühstrahl muss breit genug sein, um bei dem entsprechenden Abstand zwischen Kappenspitze und Kohlenstoß, die gesamte Höhe des Kohlenstoßes zu benetzen.
- Tropfengröße: Bei der Verwendung von Tensiden muss der einatembare und alveolengängige Tropfenanteil gering gehalten werden (unter 10 % des Volumens).
- Sprühstabilität: Das Sprühbild soll bis zum Erreichen des Kohlenstoßes stabil bleiben.
- Driftverhalten: Die Mehrheit der Tropfen soll auf den Kohlenstoß aufprallen und nicht von den Wettern mitgeführt werden.

### 7.1.3 Istzustand

Zur Analyse der Bedüsungssysteme wurden zuerst die Herstellerangaben bezüglich der Leistung der Düsen untersucht. Dazu gehörte eine Bewertung des Volumenstroms, der Spritzbreite und der Tropfengröße. Des Weiteren wurde das Verhalten der Tropfen bei Umgebungsbedingungen analysiert. Die momentan eingesetzten Düsen werden zuerst analysiert und ihre Schwachstellen definiert. Zur Überwindung der Defizite wird die Verwendung neuer Düsen vorgeschlagen, bei denen erwartet wird, dass sie in ihren Eigenschaften für die Anwendung besser geeignet sind. Anschließend erfolgt eine Bewertung der Optimierungsmaßnahme. Derzeit werden hauptsächlich Vollkegelstrahldüsen der Lechler GmbH mit der Bezeichnung 400.240.30.22 bei der Gewinnungsfeldbedüsung der RAG Deutsche Steinkohle AG, mit der internen Bezeichnung 5L-VKS Düse, eingesetzt.

## Volumenstrom

Der tatsächliche Volumenstrom [3] einer Axial-Vollkegeldüse hängt von dem Druckverhältnis wie folgt ab:

$$\dot{V}_{\text{Betr}} = \dot{V}_{\text{Nenn}} \left( \frac{P_{\text{Betr}}}{P_{\text{Nenn}}} \right)^{0,4} \quad (7.1)$$

Diese Düse weist bei den entsprechenden Betriebsdrücken folgende Volumenströme, bezogen auf einen Nennvolumenstrom von 4,98 l/min bei 5 bar, auf:

Tabelle 7.1: Volumenströme der 5L VKS-Düse.

p [bar]	$\dot{V}$ [l/min]
0,5	1,98
1	2,62
2	3,45
3	4,06
5	4,98
7	5,70
10	6,57
15	7,73
20	8,67
25	9,48
30	10,20

Bei dem üblichen Betriebsdruck von 15 bar hat die 5L VKS-Düse einen tatsächlichen Volumenstrom von 7,73 l/min.

## Sprühbreite

Für die 5L VKS-Düse gibt der Hersteller einen Strahlwinkel von 90° an. Die errechneten theoretischen Sprühbreiten sind in Tabelle 7.2 aufgelistet. Bei einem Spritzwinkel von 90° ergibt sich ein B/H Verhältnis von 2. Die effektive Sprühbreite wird erst ersichtlich nach der Begutachtung der tatsächlichen Sprühbilder der 5L VKS-Düse.

Tabelle 7.2: Theoretische Sprühbreiten der 5L VKS-Düse.

Abstand [cm]	Breite [cm]
10	20
20	40
30	60
40	80
50	100
60	120
70	140
80	160
90	180
100	200

### Tropfengröße

Zur Bestimmung der Tropfengröße wurden die Messpunkte für die Analyse des Sprühbildes bestimmt. Die ursprüngliche Messungen der Tropfengröße für die Zulassung der Düsen erfolgten mittels Phasen-Doppler-Anemometer (PDA) in dem mehrere einzelne Messpunkte entlang eines Querschnittes in 100 mm Abstand von der Düsenöffnung gemittelt wurden. Dieser Messaufbau wurde für die Zulassung von Düsen mit dem Einsatz von Tensiden verwendet und gilt hierfür als Vergleichswert. Für diese Untersuchung wurde ein Laserbeugungsmessgerät verwendet, welches den Laserstrahl durch das komplette Sprühbild schickt, wodurch mit nur einer Messung ein Mittelwert erfolgen kann. Die Vorgabe von der Bezirksregierung Arnsberg verlangt, dass der Volumenanteil an Tropfen kleiner 100  $\mu\text{m}$  maximal 10 % betragen darf. Abbildung 7.2 zeigt die Tropfengrößenverteilung der 5L VKS-Düse bei den Druckstufen 10, 15, 20, 25 und 30 bar mit der Summen- und Dichteverteilung.

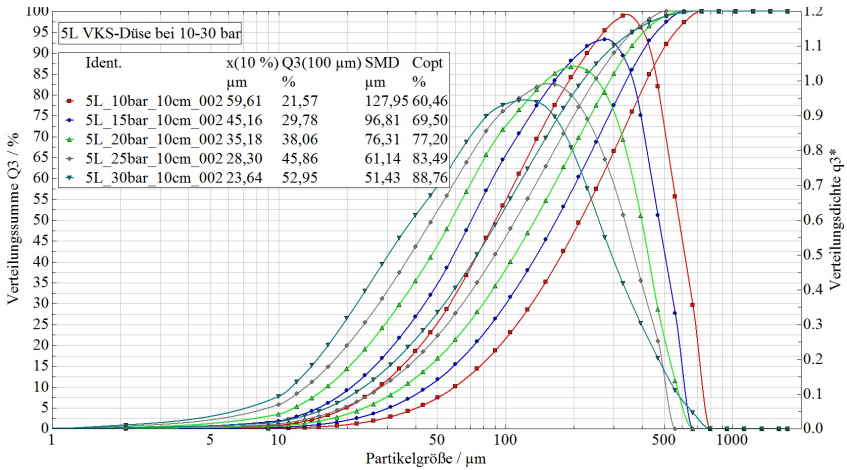


Abbildung 7.2: Tropfengrößenanalyse der 5L VKS-Düse.

Diese Darstellung zeigt deutlich den Einfluss des Drucks auf die Tropfengröße, mit steigendem Wasserdruck erhöhen sich der Volumenstrom und die optische Konzentration und dabei sinkt die Tropfengröße. Es können folgende Werte abgelesen werden:

Tabelle 7.3: Tropfengrößen der 5L VKS-Düse.

Druck [bar]	SMD [µm]	x <sub>10</sub> [µm]	Q3 (100 µm)	Q3 (10 µm)
10	127,6	59,4	21,6 %	0,0 %
15	97,0	45,2	29,7 %	0,3 %
20	76,1	35,1	38,1 %	0,6 %
25	61,2	28,4	45,8 %	1,1 %
30	50,8	23,4	53,1 %	1,8 %

Aus Tabelle 7.3 ist klar zu erkennen, dass die von der Bezirksregierung vorgegebene Grenze der Tropfengröße für die Verwendung von Tensiden nicht eingehalten wird. Unter normalen Betriebsverhältnissen von 15 bar Wasserdruck ist der Tropfenanteil kleiner 100 µm mit 29,7 % deutlich über der 10 % Grenze. Wie in Kapitel 6.2 dargestellt, kann eine hohe optische Konzentration zu starken

Verfälschungen des Tropfendurchmessers führen. Unter Berücksichtigung des Korrekturfaktors (CF), welcher für jeden Messpunkt iterativ berechnet wurde, können die tatsächlichen Tropfengrößen genauer bestimmt werden. Tabelle 7.4 zeigt den angepassten Sauterdurchmesser für diese Düse. Wie zu erwarten, ist

Tabelle 7.4: Korrigierte Tropfengrößen der 5L VKS-Düse.

Druck [bar]	SMD mess. [ $\mu\text{m}$ ]	C.opt	CF	SMD korr. [ $\mu\text{m}$ ]
10	127,6	60,4 %	0,985	129,5
15	97,0	69,4 %	0,962	100,8
20	76,1	77,3 %	0,926	82,2
25	61,2	83,5 %	0,878	69,7
30	50,8	88,8 %	0,824	61,6

nur eine geringe Anpassung des Sauterdurchmessers bei einer optischen Konzentration von 60 % nötig und mit steigender Konzentration und sinkender Tropfengröße ein steigender Korrekturfaktor zu sehen. Der Einfluss des Drucks auf die Veränderung der Tropfengröße nimmt mit steigendem Druck ab. Die erste Druckerhöhung hat einen deutlich größeren Effekt als die letzte Druckerhöhung. Zusätzlich wurde die Tropfenverteilung über dem gesamten Querschnitt in 10 cm Abständen bis zu einer Entfernung von 50 cm aufgenommen. Dafür wurde die Düsenhalterung an einem Linearmotor montiert und das Sprühbild der Düse wurde mit 1 cm/s durch die Messzone des Laserbeugungsgeräts bewegt. Der Linearmotor konnte maximal 22 cm verfahren werden. Diese Darstellung bietet eine genaue Darstellung des Sprühbildes. In Abbildung 7.3 ist der Sauterdurchmesser der einzelnen Messpunkte des Sprühbildes der 5L VKS-Düse bei 15 bar graphisch aufgetragen. Diese Düse weist in der Strahlmitte einen höheren Anteil von kleineren Tropfen auf. Im Kernbereich der mittleren 10 cm des Sprühstrahls sind die Tropfen kleiner 100  $\mu\text{m}$ . Die Tropfengröße steigt rasch mit zunehmender Strahlbreite auf Werte zwischen 150 und 180  $\mu\text{m}$  an. Die optische Konzentration, nicht dargestellt, ist im mittleren Strahlbereich am höchsten und nimmt bis zum Strahlrand kontinuierlich ab.

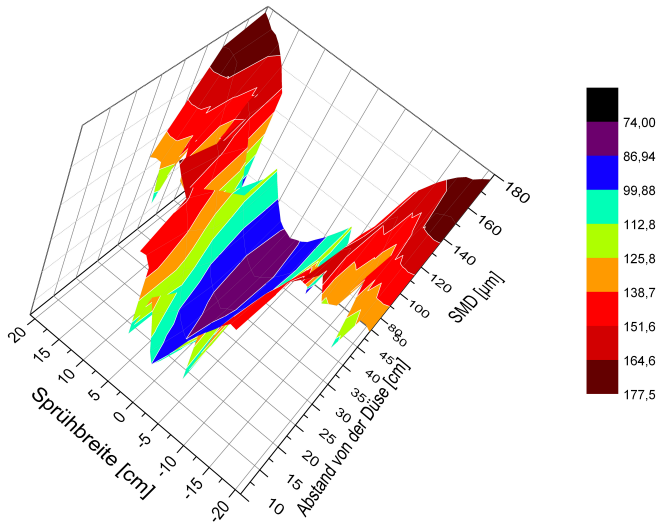


Abbildung 7.3: Sprühbild der 5L VKS-Düse.

### Sprühstabilität

Nicht nur die Tropfengröße kann einen Einblick in das Tropfenverhalten der Düse geben, sondern auch eine rein optische Untersuchung kann den Verlauf des Sprühbildes klar darstellen. Abbildung 7.4 zeigt das tatsächliche Sprühbild der 5L VKS-Düse bei einem Druck von 15 bar. Hierbei ist zu erkennen, dass der Sprühwinkel nicht mit den Herstellerangaben übereinstimmt (in Rot dargestellt) und bei einem leicht erhöhten Druck sich der Sprühwinkel schon stark auf ca.  $60^\circ$  verringert hat (in Grün dargestellt). Wird die effektive Spritzbreite abgelesen, werden deutlich geringere Spritzbreiten erzielt als in Tabelle 7.2 dargestellt. Bei einem Abstand von 50 bzw. 100 cm beträgt die tatsächliche Spritzbreite 43 bzw. 62 cm. Eine genaue Betrachtung des Sprühbildes zeigt einen uniformen Strahl bis ca. 30 cm. Anschließend fängt das Sprühbild an sich zu verändern und weicht von der ursprünglichen Flugbahn ab. Der untere Kurvenverlauf zeigt wie stark die kleineren Tropfen sich in der Atmosphäre abbremssen. Diese fallen dann aus



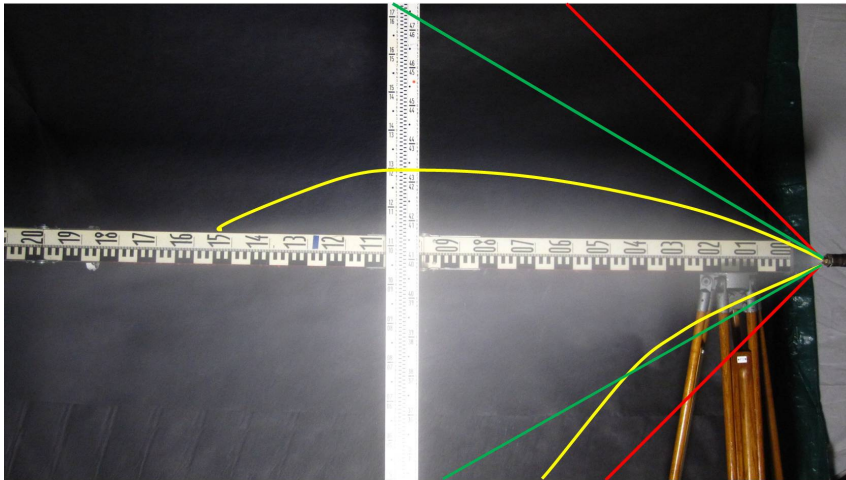


Abbildung 7.4: Sprühbild der 5L VKS-Düse.

und lassen sich von der Grenzströmung leicht mitnehmen. An dem Verlauf der oberen Kurve ist zu sehen, wie sich die Erdbeschleunigung auf die größeren Tropfen auswirkt. Sie erreichen ihre maximale Flughöhe bei 70 cm und fallen danach wieder ab. Die Abbildung zeigt deutlich, dass das Sprühbild schon bei einem Abstand von 50 cm nicht mehr stabil ist und die Tropfen stark abfallen. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Tropfen nicht genug Energie aufweisen. Die Tropfen verlieren sehr schnell ihre Stabilität und sinken ohne äußeren Einfluss zu Boden. Bei dieser niedrigen Energie ist zu erwarten, dass äußere Einflüsse größere Auswirkungen auf das Tropfenverhalten in der Luft haben.

### Driftverhalten

Das Driftverhalten der 5L VKS-Düse soll zeigen welchen Einfluss die Wettergeschwindigkeit auf den Tropfen hat und wie stark sie dadurch von ihrer Flugbahn abgelenkt werden. Die Düse wurde mittig an der oberen Fläche des Windkanals

mit senkrechter Sprühhichtung angeordnet. Zwei Messpunkte wurden verwendet, eine Messstelle direkt unter dem Düsenaustritt in einem 50 cm Abstand mittig im Windkanal und die Zweite auch in 50 cm Höhe, aber 40 cm abwetterseitig versetzt. Die 5L VKS-Düse wurde mit 15 bar betrieben. Das Driftverhalten in 50 cm Abstand vom Austrag ist in Abbildung 7.5 dargestellt. Abbildung 7.6

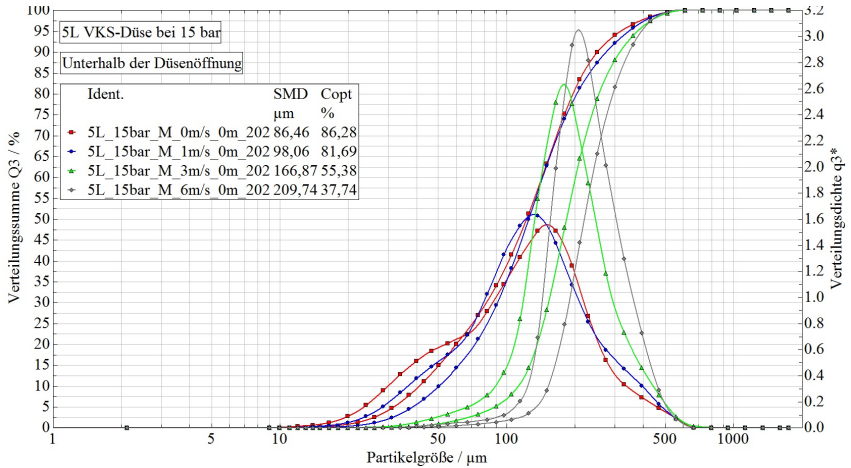


Abbildung 7.5: Driftverhalten der 5L VKS-Düse.

zeigt das Driftverhalten an einem Messpunkt, 40 cm abwetterseitig versetzt vom ersten Messpunkt. Direkt unter dem Düsenaustrag ist zu sehen, dass die Tropfenverteilungen sich bei 0 m/s und 1 m/s kaum unterscheiden. Der größere Anteil an feinen Tropfen bei 0 m/s ist auf die Verweildauer in der Luft zurückzuführen, dadurch wird der Feinanteil in der Berechnung überbewertet. In dem Fall der stehenden Luft, zirkulieren die kleinen Tropfen im Windkanal und strömen wiederholt durch den Messbereich des Laserbeugungsgeräts und verfälschen damit das Ergebnis.

Bei steigender Wettergeschwindigkeit nimmt die optische Konzentration stark ab und die Tropfengröße stark zu. Dies zeigt, dass ein großer Volumenanteil, welcher aus kleineren Tropfen besteht, sich vom Wetterstrom mittragen lässt. Die Ergebnisse der Berechnung der Volumenkonzentration nach Gleichung 6.8 ist in Tabelle 7.5 dargestellt. Hieraus ist zu erkennen, dass mit den Messwerten

Tabelle 7.5: Driftverhalten der 5L VKS-Düse.

0 m/s	86,1	86,1	0,0566
1 m/s	97,0	82,0	0,0555
3 m/s	166,8	55,5	0,0450
6 m/s	209,4	38,0	0,0334

bei der Wettergeschwindigkeit von 1 m/s als Referenz die Volumenkonzentration bei Wettergeschwindigkeiten von 3 m/s bzw. 6m/s um 19 % bzw 40 % abnimmt bei einem Abstand von der Düsenöffnung von nur 50 cm. Wird die Messung abwetterseitig in einem Abstand von 40 cm zur Strahlmitte durchgeführt, siehe Abbildung 7.6, wird erst einmal nur der Randbereich des

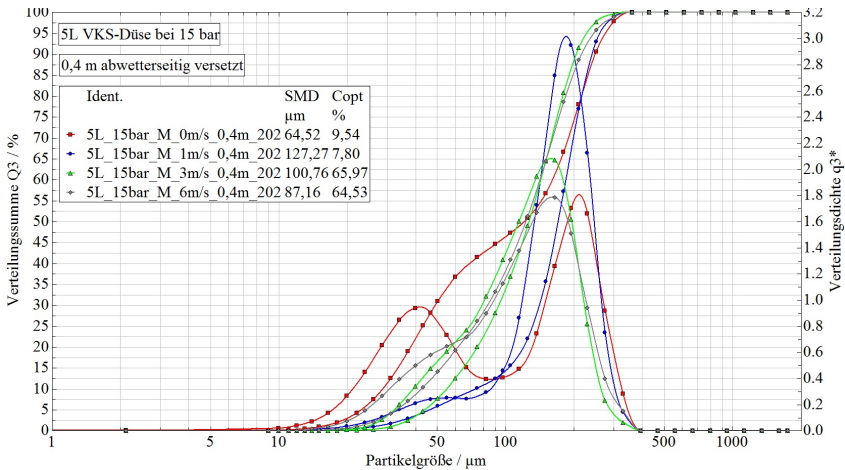


Abbildung 7.6: Driftverhalten der 5L VKS-Düse 40 cm versetzt.

Sprühbildes erfasst, welches durch die geringe optische Konzentration zu erkennen ist. Hier ist die Auswirkung der in der Luft verweilenden kleinen Tropfen bei 0 m/s deutlich größer, da vom eigentlichen Strahl im Randbereich weniger Tropfen vorhanden sind. Bei 1 m/s ist in der Dichteverteilungskurve durch den deutlichen Anstieg in der Tropfengröße und einer leichten Verminderung der optischen Konzentration zu erkennen, dass nur die feinste Fraktion an Tropfen

von dem Wetterstrom weggetragen werden. Mit Erhöhung der Wettergeschwindigkeit steigt die optische Konzentration rasch an und die Tropfengröße nimmt ab. Bei einer sehr hohen Wettergeschwindigkeit sinkt der Tropfendurchmesser weiter mit einer leichten Abnahme in der optischen Konzentration. Die tatsächliche Wassermenge lässt sich nur mit der Darstellung der Volumenkonzentration beschreiben, siehe Tabelle 7.6. Sie zeigt, dass bei geringen Wettergeschwindig-

Tabelle 7.6: Driftverhalten der 5L VKS-Düse 40 cm versetzt.

<b>Wetter- geschwindigkeit</b>	<b>SMD [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>C.opt [%]</b>	<b>Vol.konz. [<math>\text{l}/\text{m}^3</math>]</b>
0 m/s	66,6	9,2	0,0022
1 m/s	126,1	7,9	0,0035
3 m/s	100,7	66,0	0,0362
6 m/s	87,2	64,0	0,0297

keiten nur ein geringer Anteil an Tropfen vorhanden ist. Schon ab einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s steigt die Volumenkonzentration sehr stark und bei 6 m/s sinkt diese wieder aufgrund der starken Tropfenmitnahme bei hohen Geschwindigkeiten. Werden diese Werte mit denen aus Tabelle 7.5 verglichen, zeigt sich im Vergleich zu den Referenzwerten ein ähnlicher Sauterdurchmesser bei der 40 cm versetzten Messung bei 3 m/s.

Wird die Tropfenverteilung bei 1 m/s und 0 cm Verschiebung, wo ein stabiler Strahl ohne verfälschenden Feinanteil vorherrscht, mit der bei 3 m/s und 40 cm Verschiebung verglichen, siehe Abbildung 7.7, zeigt sich eine sehr ähnliche Tropfenverteilung. Die Verteilungssumme und die Verteilungsdichte sind für die unteren 65 % der Kurven annähernd identisch. Nur der geringe Anteil an Tropfen größer 150  $\mu\text{m}$  hat sich nicht mittragen lassen. Dieser Anteil ist in der Volumenverteilung mit ca. 35 % zu bewerten, ist aber bezogen auf eine Anzahlverteilung nur eine geringe Anzahl an Tropfen. Dieses Ergebnis zeigt, dass bei dieser Düse nur die Tropfen größer 150  $\mu\text{m}$  ein ausreichend stabiles Flugverhalten bei höheren Wettergeschwindigkeiten vorweisen.

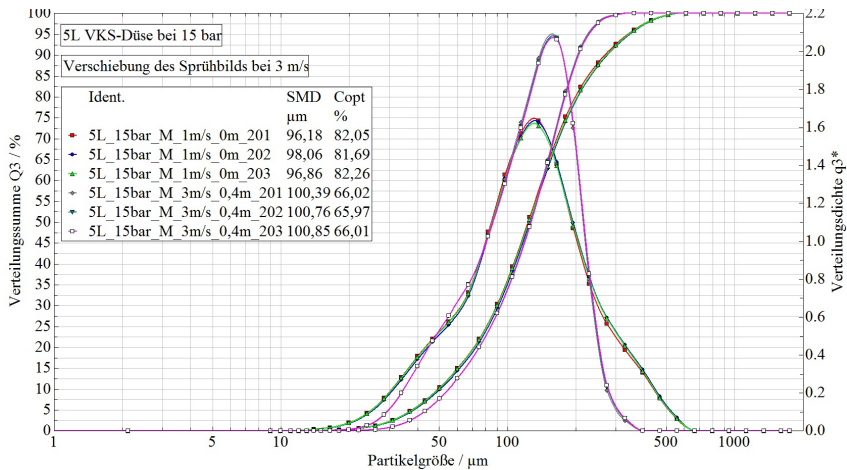


Abbildung 7.7: Verschiebung des Sprühbilds der 5L VKS-Düse.

### Eignung der Düse

Die 5L VKS-Düse ist nur bedingt für den Einsatz bei der Gewinnungsfeld-bedüsung geeignet. Das Sprühbild dieser Düse ist nicht ausreichend stabil bzw. breit genug, um bei größeren Entfernungen den Kohlenstoß zu benetzen. Sie weist einen tatsächlichen Sprühwinkel von nur  $60^\circ$  auf und die Stabilität des Sprühbildes nimmt schon bei einer Entfernung von 50 cm ab. Die Tropfen haben nicht genug Energie, um diese Aufgabe zu erfüllen. Höhere Energie kann durch einen höheren Druck umgesetzt werden, hat aber den Nachteil, dass die Tropfen dadurch noch kleiner werden und die Spritzbreite verringert wird. Bei höheren Wettergeschwindigkeiten werden nur 35 % der versprühten Tropfen nach Volumen nicht von dem Wetterstrom beeinflusst und mitgetragen.

### 7.1.4 Sollzustand

Die Wahl einer geeigneten Düse hängt von der Erfüllung der bereits beschriebenen Aufgabe ab. Aus einer Vielzahl von Düsen unterschiedlichster Hersteller und Bauarten wurden die charakteristischen Grundeigenschaften aufgenommen und miteinander, in Bezug auf die Aufgabenerfüllung, verglichen. Aus der Menge wurden nur Einstoffdruckdüsen für diesen Einsatzort ausgewählt, die einen Volumenstrom von ca. 11 l/min, eine Sprühweite von mindestens 60° und einen entsprechend grobes Tropfenspektrum vorwiesen. Der Volumenstrom lässt sich aus der ausreichenden Befeuchtung des Kohlenstoßes im Hobelbetrieb bei einer Ansteuerung von 12 Düsen vor und hinter dem Hobel, ermittelt aus dem Nomogramm in Abbildung 3.2 bei einer Hobelgeschwindigkeit von 2 m/s, einer Schnitttiefe von 10 cm, einer Mächtigkeit von 1,5 m und einer Kohlenfeuchte von 15 l/m<sup>3</sup>, bestimmen. Auf eine Darstellung aller untersuchten Düsen wird verzichtet, dafür werden die ausgewählten Düsen im Detail betrachtet.

Aufgrund der Voruntersuchungen wurde die Lechler Flachstrahldüse 612.644.30 als mögliche Ersatzdüse für die Gewinnungsfeldbedüsung identifiziert. Um bei den üblichen internen Typenbezeichnungen der RAG Deutsche Steinkohle AG zu bleiben, wird diese Düse als 6L FS-Düse (bei 5 bar) bezeichnet. Sie weist eine hohe Sprühbreite und größere Tropfen bei einem ähnlichen Wasserverbrauch auf. Sie wird im Folgenden analog zur der aktuell verwendeten Düse analysiert.

### Volumenstrom

Der tatsächliche Volumenstrom einer Flachstrahldüse hängt von dem Druckverhältnis wie folgt ab:[3]

$$\dot{V}_{\text{Betr}} = \dot{V}_{\text{Nenn}} \left( \frac{P_{\text{Betr}}}{P_{\text{Nenn}}} \right)^{0,5} \quad (7.2)$$

Diese Düse weist bei den entsprechenden Betriebsdrücken die Volumenströme in Tabelle 7.7, bezogen auf einen Nennvolumenstrom von 8,94 l/min bei 10 bar, auf. Bei dem unter Tage verwendeten Betriebsdruck von 15 bar hat die 6L FS-Düse einen tatsächlichen Volumenstrom von 10,95 l/min.

Tabelle 7.7: Volumenstrom der 6L FS-Düse.

<b>p [bar]</b>	<b><math>\dot{V}</math> [l/min]</b>
0,5	2,00
1	2,83
2	4,00
3	4,90
5	6,32
7	7,48
10	8,94
15	10,95
20	12,65
25	14,14
30	15,49

### Sprühbreite

Für die 6L FS-Düse gibt der Hersteller einen Strahlwinkel von  $60^\circ$  an. Die errechneten theoretischen Sprühbreiten sind in Tabelle 7.8 aufgelistet. Bei einem Spritzwinkel von  $60^\circ$  ergibt sich ein B/H Verhältnis von 1,15.

Tabelle 7.8: Theoretische Sprühbreiten der 6L FS-Düse.

<b>Abstand [cm]</b>	<b>Breite [cm]</b>
10	11,5
20	23,1
30	34,6
40	46,2
50	57,7
60	69,3
70	80,8
80	92,4
90	103,9
100	115,5

Tropfengröße

Abbildung 7.8 zeigt die Tropfengrößenverteilung der 6L FS-Düse bei Drücken von 10, 15, 20, 25 und 30 bar. Hier sind die Summen- und die Dichteverteilungen dargestellt. Für jede Messung sind die wichtigen Messwerte in der Legende angegeben. Im Vergleich zu der 5L VKS-Düse gibt Tabelle 7.9 die wichtigsten

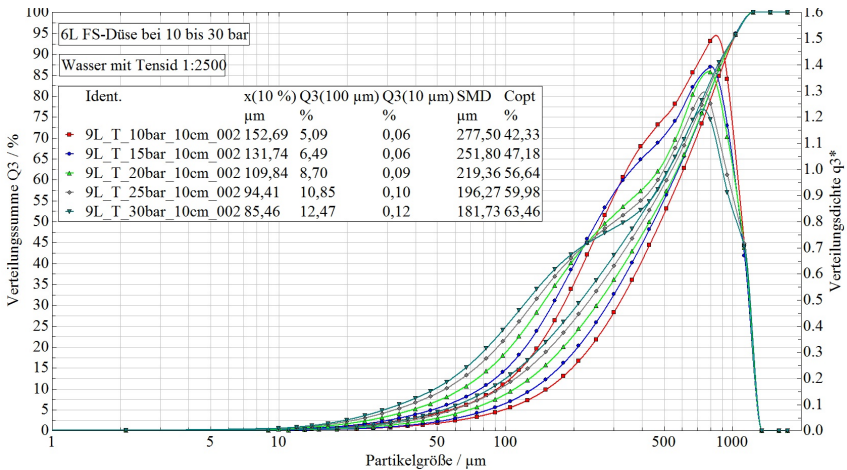


Abbildung 7.8: Tropfengrößenanalyse der 6L FS-Düse.

Kennzahlen dieser Messreihe wieder.

Tabelle 7.9: Tropfengrößen der 6L FS-Düse.

Druck [bar]	SMD [µm]	x10 [µm]	Q3 (100 µm)	Q3 (10 µm)
10	272,0	150,0	5,3 %	0,1 %
15	249,1	131,6	6,5 %	0,1 %
20	232,4	117,8	7,8 %	0,1 %
25	211,4	103,6	9,5 %	0,1 %
30	191,0	90,5	11,5 %	0,1 %

Es ist eindeutig ersichtlich, dass keine alveolengängige Tropfen und nur ein geringer Anteil an einatembaren Tropfen von der 6L FS-Düse erzeugt werden. Der



Volumenanteil an Tropfen kleiner  $100\text{ }\mu\text{m}$  überschreitet den von der Bezirksregierung vorgegebenen Grenzwert von 10 % erst bei einem Betriebsdruck von 30 bar. Unter normalen Bedingungen kann die Verwendung von Tensiden bei dieser Düse befürwortet werden. Eine zusätzliche Betrachtung des Korrekturfaktors bezüglich einer Verfälschung der Messergebnisse nach Gleichung 6.2 ist nicht nötig, da sie größer 99 % ist.

Eine genaue Analyse des Sprühbildes in Abbildung 7.9 zeigt den Sauterdurchmesser über das gesamte Sprühbild. Bei dieser Flachstrahldüse sind die Tropfen in der Mitte des Sprühstrahls grober als am Rand des Strahls. In der Mitte des Sprühstrahls bilden sich Tropfen zwischen  $169,8$  und  $148,2\text{ }\mu\text{m}$  und am Sprührand werden die Tropfen nicht kleiner als  $105,1\text{ }\mu\text{m}$ . Die Tropfengrößen sind beim ausgebildeten Strahl gleichmäßiger verteilt als bei der 5L VKS-Düse. Damit weist die 6L FS-Düse ein deutlich gröberes Tropfenspektrum auf.

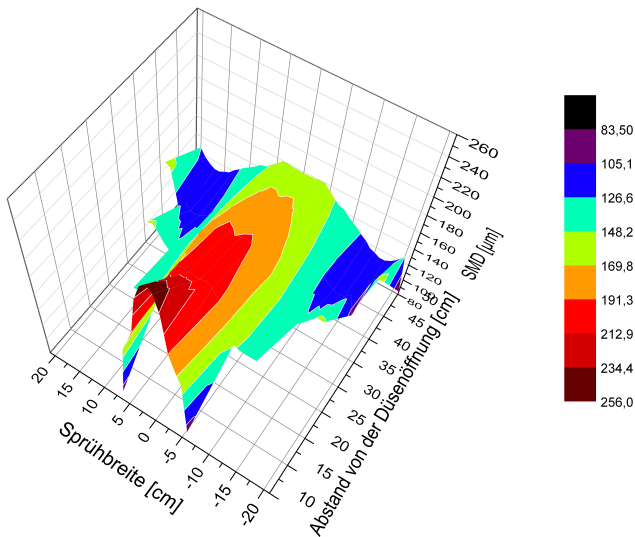


Abbildung 7.9: Sprühbild der 6L FS-Düse.

### Sprühstabilität

Die tatsächliche Gestaltung des Sprühbildes kann in den Fotoaufnahmen gesehen werden. Abbildung 7.10 zeigt das tatsächliche Sprühbild der 6L FS-Düse bei einem Druck von 15 bar. Hierbei ist zu erkennen, dass der Sprühwinkel kaum von dem Wert des Herstellers, ( $60^\circ$ ) in Rot dargestellt, abweicht. Wird

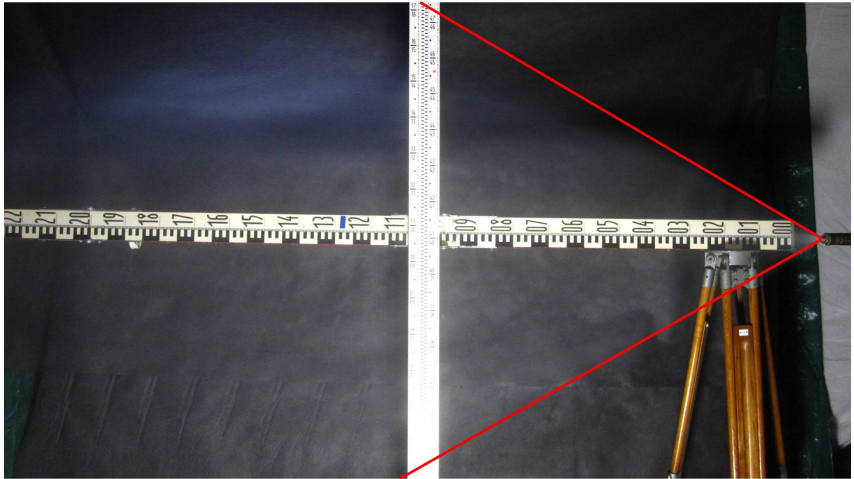


Abbildung 7.10: Sprühbild der 6L FS-Düse.

die effektive Spritzbreite abgelesen, weicht diese nur gering von den theoretischen Spritzbreiten in Tabelle 7.8 ab. Bei einem Abstand von 50 bzw. 100 cm beträgt die tatsächliche Spritzbreite 60 cm bzw. 110 cm. Aus den Aufnahmen ist klar erkennbar, dass das Sprühbild bis zu einem Abstand von ca. 2 m stabil bleibt. Dies ist ein Zeichen dafür, dass die Tropfen genügend Energie aufweisen, um den Kohlenstoß zu erreichen.

### Driftverhalten

Bei der 6L FS-Düse musste die Messanordnung angepasst werden, da die Ausrichtung des Flachstrahls eine große Auswirkung auf die Messergebnisse hat. Diese Messung wurde analog zur 5L VKS-Düse durchgeführt, nur mit dem Un-

terschied, dass die Flachstrahldüse parallel zum Wetterstrom ( $0^\circ$ ) und in einem Winkel von  $45^\circ$  zum Wetterstrom ausgerichtet wurde. Die Auswertung zur parallelen Anordnung ist in Abbildungen 7.11 und 7.12 zu sehen. Ein Vergleich der

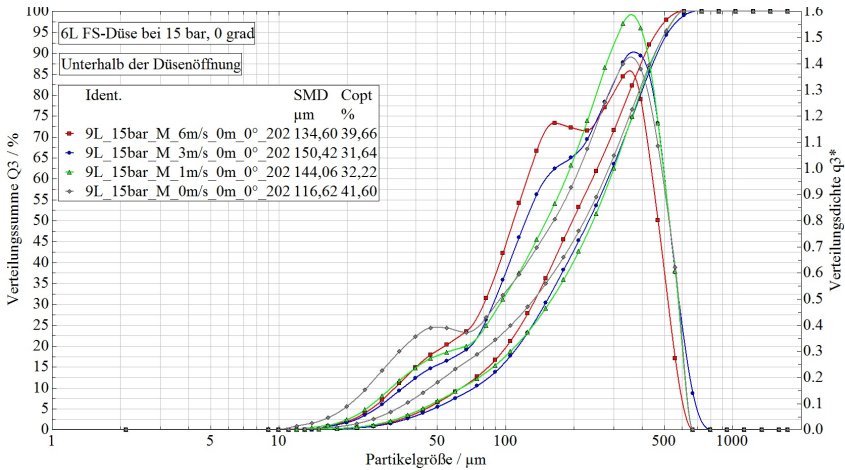


Abbildung 7.11: Driftverhalten mit paralleler Anordnung der FS-Düse.

Messkurven zeigt die bekannte Feinanteilverfälschung bei 0 m/s. Das bi-modale Verhalten der Verteilungsdichte der grauen Kurve zeigt einen erhöhten Anteil an kleineren Tropfen, welche durch das Aufwirbeln dieser in der stehenden Luft zu einer Überbewertung derselbigen durch ihre Mehrfachbemessung während des Versuchs führen. Die groberen Tropfen prallen direkt gegen den Kanalboden und zirkulieren nicht weiter in der Luft. Das Maximum der Verteilungsdichte, gemessen direkt unterhalb der Düse, bleibt konstant zwischen 300 und 400  $\mu\text{m}$  und deutet darauf hin, dass die groben Tropfen sich auch bei hohen Wettergeschwindigkeiten nicht mittragen lassen. Die Unterschiede der Kurven ist eher im Feinbereich zu erkennen. Der weitere Verlauf der Kurven mit der parallelen Düsenausrichtung bei steigender Wettergeschwindigkeit zeigt keine Abnahme bei der optischen Konzentration und eine geringe Veränderung der Tropfengröße. Lediglich bei 6 m/s ist eine Veränderung zu erkennen, hier nimmt der Tropfenanteil unter 200  $\mu\text{m}$  zu, was auf eine Mitführung der kleineren Tropfen aus dem Strahlrandbereich zurückzuführen ist. Die Bildung einer zweiten Spitze

in der Dichteverteilungskurve zwischen 100 und 200  $\mu\text{m}$  deutet darauf hin, dass ein gewisser Anteil an Tropfen in diesem Größenbereich sich aus dem Sprühquerschnitt vor der Messzone bei den höheren Wettergeschwindigkeiten mittragen lassen hat. Dies erklärt auch die Zunahme in der optischen Konzentration. Die Signalstärke des Lasers wird zusätzlich zu den stabilen groben Tropfen noch von der vermehrten mittleren Fraktion geschwächt. Tabelle 7.10 zeigt den Verlauf

Tabelle 7.10: Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse.

<b>Wetter- geschwindigkeit</b>	<b>SMD [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	<b>C.opt [%]</b>	<b>Vol.konz. [<math>\text{l}/\text{m}^3</math>]</b>
0 m/s	116,6	41,6	0,0209
1 m/s	144,1	32,2	0,0187
3 m/s	150,4	31,6	0,0191
6 m/s	134,6	39,7	0,0227

des Sauterdurchmessers, der optischen Konzentration und der daraus berechneten Volumenkonzentration bei den unterschiedlichen Wettergeschwindigkeiten dieser Messung. Hieraus wird der geringe Anstieg der Volumenkonzentration mit steigender Wettergeschwindigkeit ersichtlich, welche fälschlicher Weise bei der optischen Konzentration als deutlicher Sprung zu erkennen war. Bei dieser Düse werden nur kleine Veränderungen in der Tropfenverteilung beobachtet. Abbildung 7.12 zeigt die Tropfenverschiebung in 40 cm abwetterseitiger Entfernung von der Strahlmitte. Es ist kein deutlicher Anstieg der optischen Konzentration bis eine Wettergeschwindigkeit von 6 m/s zu erkennen. Dort ist der Anstieg im Verhältnis auch gering. Die Verteilungsdichte bei niedrigen Wettergeschwindigkeiten weist hauptsächlich nur den Feintropfenanteil auf. Bei höheren Wettergeschwindigkeiten führen die Randbereichstropfen, die sich in Abbildung 7.11 in die Mitte verschoben haben, zu einer Vergrößerung des Tropfenkollektivs zwischen 100 und 200  $\mu\text{m}$ .

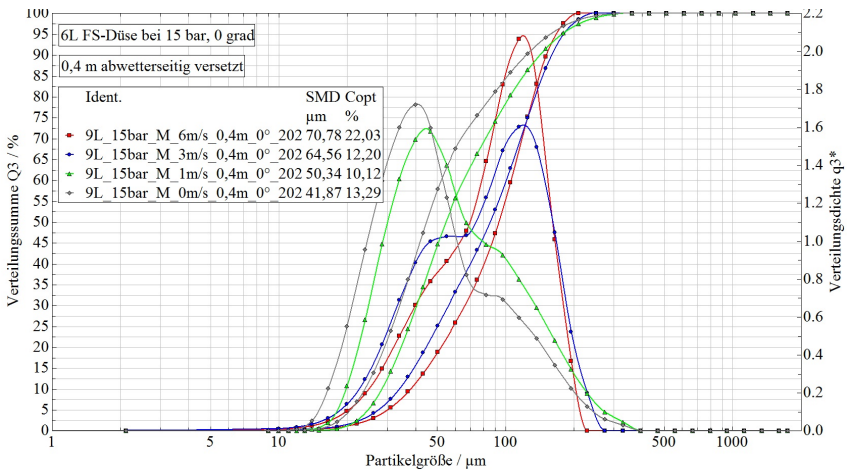


Abbildung 7.12: Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt.

Tabelle 7.11: Driftverhalten mit paralleler Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt.

Wetter- geschwindigkeit	SMD [ $\mu\text{m}$ ]	C.opt [%]	Vol.konz. [ $\text{l}/\text{m}^3$ ]
0 m/s	41,9	13,3	0,0020
1 m/s	50,3	10,1	0,0018
3 m/s	64,6	12,2	0,0028
6 m/s	70,9	22,0	0,0059

Tabelle 7.11 zeigt wie die Tropfengröße am Rand des Sprühstrahls steigt und gleichzeitig die Volumenkonzentration ansteigt bzw. sich bei einer Wettergeschwindigkeit von 6 m/s verdoppelt. Im Vergleich zu den Messungen in der Strahlmitte sind diese Konzentrationen als sehr gering einzustufen. Bei dieser Messanordnung hat sich gezeigt, dass die Tropfen größer 200  $\mu\text{m}$  nicht von dem Wetterstrom erfasst und mitgetragen werden, lediglich eine geringe Konzentration an kleinen Tropfen hat sich aus dem Messbereich entfernen lassen.

Abbildungen 7.13 und 7.14 zeigen das Driftverhalten bei der  $45^\circ$  Anordnung. Eine  $45^\circ$  Ausrichtung der Düse führt zu einer Konzentrationserhöhung im Messbereich, da durch den Winkel ca. 70 % mehr von dem Sprühbild erfasst wird. Der Messbereich, definiert durch den Durchmesser des Laserstrahls, wird durch die Schiefstellung eine größere Fläche des Strahls geboten. Die Strahlrandbereiche sind deutlich näher an die Messzone gerückt und die Tropfen bieten der Luftströmungsfront zusätzlich eine größere Fläche an, welche eine stärkere Mitnahme von Tropfen durch den Wetterstrom als Folge haben kann. Abbildung 7.13

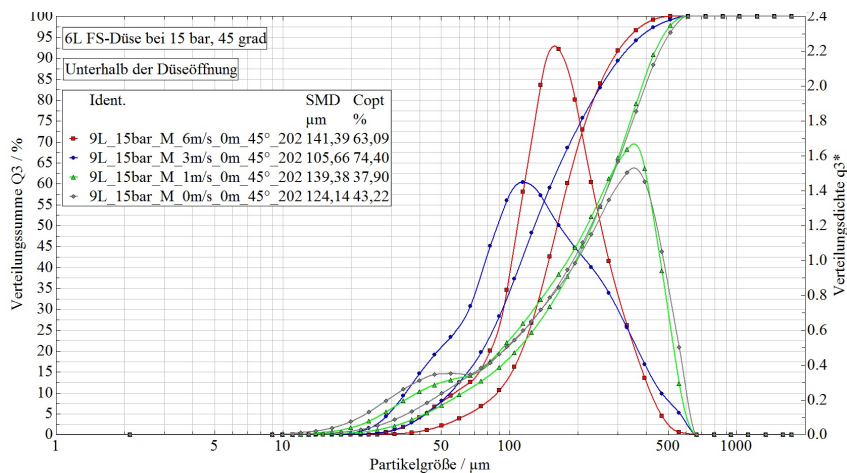


Abbildung 7.13: Driftverhalten mit  $45^\circ$  Anordnung der 6L FS-Düse.

zeigt, dass die Kerntropfenverteilung zwischen 100 und 400  $\mu\text{m}$  bleibt, nur eine Verschiebung der Dichteverteilungsspitze bei Veränderung der Wettergeschwindigkeit ist zu erkennen. Die Tendenzen, bei der Verschiebung kleinerer Tropfen,

bleiben gleich wie bei der parallelen Anordnung. Der stabile Kern des Sprühbildes bleibt bis hin zu Wettergeschwindigkeiten von 6 m/s aufrechterhalten. Tabelle 7.12 zeigt die Ergebnisse dieser Messung. Die bekannten leichten Schwan-

Tabelle 7.12: Driftverhalten mit 45° Anordnung der 6L FS-Düse.

<b>Wetter- geschwindigkeit</b>	<b>SMD [μm]</b>	<b>C.opt [%]</b>	<b>Vol.konz. [l/m<sup>3</sup>]</b>
0 m/s	124,1	43,2	0,0234
1 m/s	139,4	37,9	0,0221
3 m/s	105,7	74,4	0,0480
6 m/s	141,4	63,1	0,0470

kungen der Ergebnisse bei Wettergeschwindigkeiten zwischen 0 und 1 m/s sind zu erkennen. Bei einer Wettergeschwindigkeit von 3 m/s ist eine deutliche Verschiebung von feineren Tropfen aus dem Sprührandbereich in die Messzone zu beobachten. Eine weitere Erhöhung der Wettergeschwindigkeit führt dazu, dass die kleinsten Tropfen unter ca. 100 μm von dem Wetterstrom noch weiter mitgetragen wurden. Der Anteil dieser kleinst Tropfenklasse an dem Gesamtvolumen ist aber mit einem Verlust von 2 % in der Volumenkonzentration sehr gering. Abbildung 7.14 zeigt analog zu Abbildung 7.12 einen deutlichen Anstieg der feineren Tropfenfraktion zwischen 100 und 200 μm, mit dem Unterschied, dass die optische Konzentration deutlich stärker ansteigt. Auch die Tropfengröße steigt bei dieser Messanordnung stärker an, dabei bleibt der Sauterdurchmesser aber unter 100 μm. Tabelle 7.13 zeigt den Verlauf der Messergebnisse für die unterschiedliche Wettergeschwindigkeiten bei der 45° Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt. Hieraus ist deutlich zu erkennen, dass durch die schräge Anordnung der Düse im Windkanal die Tropfen einfacher vom Wetterstrom erfasst werden können. Dabei werden aber nur Tropfen mitgetragen die kleiner als 200 μm sind.

Die Variationen in der Anordnung der 6L FS-Düse haben gezeigt, dass das Driftverhalten dieser Düse auch bei höheren Wettergeschwindigkeiten gering bleibt und nur ein kleiner Prozentsatz der feineren Tropfen von den Wettern mitgetragen wird.

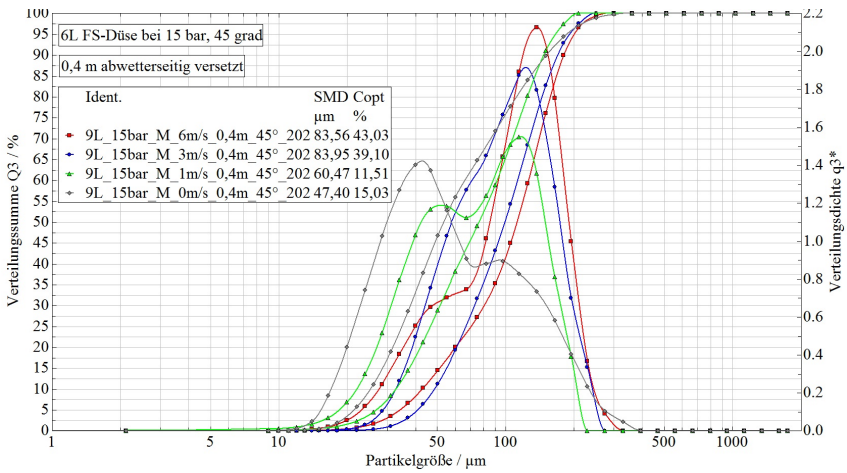


Abbildung 7.14: Driftverhalten mit 45° Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt.

Tabelle 7.13: Driftverhalten mit 45° Anordnung der 6L FS-Düse 40 cm abwetterseitig versetzt.

Wetter- geschwindigkeit	SMD [µm]	C.opt [%]	Vol.konz. [l/m³]
0 m/s	47,4	15,0	0,0026
1 m/s	60,5	11,5	0,0025
3 m/s	83,9	39,1	0,0139
6 m/s	83,6	43,0	0,0157



### 7.1.5 Auswertung der Optimierung

Diese Ergebnisse zeigen, dass die 6L FS-Düse für die Anwendung im Gewinnungsfeld geeignet ist und deutliche Vorteile gegenüber der 5L VKS-Düse aufweist. Wenn die Anforderungen an eine Düse für die Gewinnungsfeldbedüsung betrachtet werden, muss diese Düse ihr Primärziel, die Benetzung des Kohlenstoßes, erreichen. Erstens, um die Ziele zu verwirklichen, soll diese Düse eine große Sprühbreite aufweisen. Die 6L FS-Düse erreicht eine Sprühbreite von ca. 1,1 m bei einem Abstand von 1 m. Bei einem vergleichbaren Abstand erreicht die 5L VKS-Düse nur eine Sprühbreite von 0,6 m. Zweitens, soll diese Düse ein stabiles Sprühbild über die Entfernung zum Kohlenstoß haben. Die 6L FS-Düse erfüllt auch dieses Kriterium. Drittens sollen bei dem Einsatz von Tensiden die alveolengängigen und einatembaren Tropfenanteile des Sprühkollektives nicht mehr als 10 % nach Volumen aufweisen. Die 6L FS-Düse erreicht diese Grenze bei dem einatembaren Anteil erst bei einem Betriebsdruck von 30 bar. Das Sprühbild weist keine Tropfen in dem alveolengängigen Bereich auf. Letztens sollen die Tropfen mit einer ausreichenden Größe und genügend Energie aus der Düse austreten, um zu verhindern, dass die Tropfen vor dem Erreichen des Kohlenstoßes von dem Wetterstrom im Streb mitgetragen werden. Die 6L FS-Düse bleibt im Sprühbild bis zu Wettergeschwindigkeiten von 6 m/s stabil. Damit erfüllt die 6L FS- Düse alle Anforderungen für den Einsatz bei der Gewinnungsfeldbedüsung.

## 7.2 Heckraum

Im Schildausbau ist zusätzlich die Kappendachbefeuchtung, die Bruchschildbedüsung und die Bruchraumbedüsung installiert. Bei den ersten beiden besteht keine akute Notwendigkeit einer Optimierung. Die Bruchraumbedüsung erfolgt mit Vollkegelstrahldüsen (Lechler 400.240.16.01), die mit einem Nenndurchfluss von 2,5 l/min bei 5 bar arbeiten. Diese Bedüsungen werden entsprechend dem Rückvorgang des Schildes für begrenzte Zeit angesteuert und sollen den Staub aus dem Bruchraum verhindern, wenn dort das Hangende bricht. Die Bruchraumbedüsung befindet sich am Heck des Schildes in einem vom Streb geschützten Bereich. Eine gewisse Zeit nach dem Rückvorgang geht das Hangende zu Bruch, welcher eine große Staubwolke auslöst. Diese Staubquelle, anders als bei den anderen Einsatzorten, kommt aus dem Nebengestein und hat dadurch einen größeren Quarzanteil.

### 7.2.1 Istzustand

Die Heckraumbedüsung besteht aus Vollkegelstrahldüsen, welche rückseitig am Schildausbau montiert sind. Diese 2,5L VKS-Düsen werden mit 5 bis 100 bar, abhängig von der Steuerung, betrieben. Die Leistung dieser Düse wird durch ihren Wasserverbrauch, das erzeugte Tropfenkollektiv und ihre Effektivität bei der Staubbinding dargestellt. Als großes Problem steht die Unsicherheit bei der Bestimmung des Zeitpunktes des Bruchs. Dies kann dazu führen, dass zu dem Zeitpunkt der Staubentstehung die Bedüsung, die dieses kontrollieren soll, in dem Bereich nicht läuft.

### Volumenstrom

Aus Gleichung 7.1, siehe Abschnitt 7.1, kann der Volumenstrom der 2,5L VKS-Düse berechnet werden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.14 dargestellt. Bei einem normalen Betriebsdruck von 15 bar versprüht diese Düse 3,9 l/min in den Heckraum, bei dem maximal angegebenen Druck 8,3 l/min.

Tabelle 7.14: Volumenstrom der 2,5L VKS-Düse.

$p$ [bar]	$\dot{V}$ [l/min]
5	2,50
7	2,86
10	3,30
15	3,88
20	4,35
25	4,76
30	5,12
35	5,44
40	5,74
50	6,28
60	6,75
70	7,18
80	7,58
90	7,94
100	8,29

### Tropfengröße

Die Tropfengröße dieser Düse konnte aufgrund der Pumpenleistung nur bis 45 bar aufgenommen werden. Die Messung wurde analog zu Kapitel 7.1 durchgeführt. Die Tropfengrößenverteilung der 2,5L VKS-Düse ist in Abbildung 7.15 dargestellt. Diese Messergebnisse zeigen einen Sauterdurchmesser von 99,3 bis 67,2  $\mu\text{m}$  bei 10 bis 45 bar. Die Tropfengrößenverteilungen zeigen alle einen ähnlichen Verlauf, der nur entlang der x-Achse leicht verschoben ist. Die Verteilungssumme zeigt ihren höchsten Wert bei jeder Druckstufe zwischen 100 und 200  $\mu\text{m}$ . Die optische Konzentration bei der Messung war zwischen 55,8 und 89,2 % und damit in einem Bereich, in der die Mehrfachstreuung, wie in Kapitel 7.2 dargestellt, zu einer Verfälschung der Messergebnisse führen kann. Eine iterative Berechnung des Korrekturfaktors liefert den tatsächlichen Verlauf des Sauterdurchmessers mit dem Betriebsdruck, siehe Tabelle 7.15. Die Korrektur des Sauterdurchmessers zeigt für die ersten Druckstufen eine deutliche Verkleinerung der Tropfen mit steigendem Druck. Bei den höheren Druckstufen fällt diese Veränderung kleiner aus.

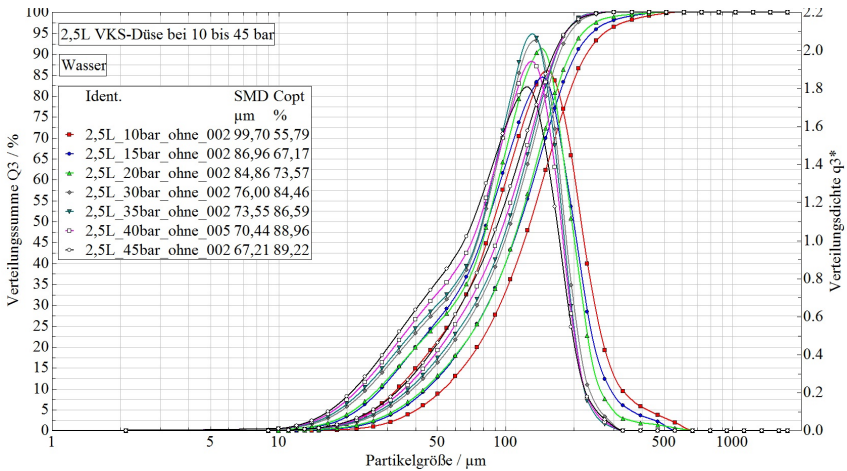


Abbildung 7.15: Tropfengrößenanalyse 2,5L VKS-Düse.

Tabelle 7.15: Sauterdurchmesser der 2,5L VKS-Düse.

p [bar]	SMD <sub>m</sub> [μm]	C.opt [%]	CF	SMD <sub>o</sub> [μm]
10	99,3	55,8	0,978	101,5
15	86,2	67,2	0,957	90,1
20	84,6	73,6	0,944	89,6
30	75,8	84,5	0,905	83,8
35	73,4	86,6	0,894	82,1
40	70,4	89,0	0,879	80,0
45	67,2	89,2	0,870	77,2

## **Staubbindung**

Da die Kappendachbefeuchtung und die Bruchschildbedüsung schon zu einer Vorbefeuchtung des Hangenden geführt haben, gilt es hier, den frisch entstandenen Staub durch das Auseinanderbrechen und den Fall des Hangenden niederzuschlagen und zu verhindern, dass dieser bis in den Strebraum vordringen kann. Bei einem Betriebsdruck von 15 bar binden die Tropfen der 2,5L VKS-Düse ca. 39 % des A-Staubs im Windkanal. Bei einem Volumenstrom von 3,9 l/min beträgt die effektive Staubbindeeffektivität rund 10 %/l/min. Dieses Ergebnis ist im Vergleich zu den Versuchsdüsen in Kapitel 6.3 weniger erwünschenswert. Aus diesen Vorversuchen wurden mit Einstoffdruckdüsen Staubbindeeffektivitäten von bis zu 80 % erzielt. Im Alten Mann herrschen nur sehr geringe Wettergeschwindigkeiten, mit einer kleinen Erhöhung zum Zeitpunkt des Bruches. Da ein Abdriften der Tropfen, wie im Streb dargestellt, unwahrscheinlich ist, könnte eine deutlich effektivere Düse eingesetzt werden, wie z.B. eine Hohlkegeldüse der Lechler Baureihe 200.140.

### 7.2.2 Sollzustand

Da der Zeitpunkt des Bruchs nicht genau bestimmt werden kann, sollte die Bedüsung für längere Zeit den Bruchraum abschotten. Das Sprühbild der Düse sollte den Schildzwischenraum abdecken, wofür eine Vollkegelstrahldüse oder eine breite Flachstrahldüse geeignet wäre. Sollte die Düsenpositionierung verändert werden, kann eine senkrechte Tropfenwand bei der Verwendung von Flachstrahldüsen erzeugt werden. Die Verwendung einer Düse mit kleineren Tropfen bewirkt eine Erhöhung der Staubbindeeffektivität und dadurch kann die Düse wiederum mit einem geringeren Wasserverbrauch betrieben werden. Um die Bedüsung am sinnvollsten auszulegen, musste zuerst eine Analyse des Bruchverhaltens durchgeführt werden, in der die durchschnittliche Bruchdauer festgestellt wird. Diese wird natürlich von der Beschaffenheit des Hangenden abhängig sein und von Baufeld zu Baufeld unterschiedlich sein. Wie schon bei der Darstellung der Entwicklungen bei der technischen Staubbekämpfung gezeigt, können Erfahrungswerte und experimentell ermittelte Düsenansteuerungspläne effektiv sein. Als Beispielrechnung sollte eine Düse mit einem Tropfendurchmesser von 50  $\mu\text{m}$  an Stelle von 100  $\mu\text{m}$  verwendet werden. Alle anderen Einflussfaktoren für die Berechnung der Staubbindeeffektivität nach Gleichung 6.6 werden gleich gehalten und das Ergebnis ist eine gesteigerte effektive Staubbindeeffektivität um das 2,05-fache. Dies bedeutet, dass die gleiche Staubmenge, statt mit 3,9 l/min, mit 1,9 l/min niedergeschlagen werden kann. Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass die Düse bei dem gleichen Wasserverbrauch über den doppelten Zeitraum betrieben werden könnte. Damit könnte der unbestimmbare Zeitraum des Hangendbruchs besser abgedeckt werden und verhindern, dass Staub unkontrolliert in den Strebraum eindringt.

## 7.3 Brecher

Am Kohlenbrecher in der Kohlenabfuhrstrecke sind jeweils vier Flachstrahldüsen (Lechler 612.487.30) auf einer Düsenleiste angebracht. Insgesamt sind drei Düsenleisten am Brecher montiert. Es befindet sich jeweils eine Düsenleiste an dem Brechereinlauf, an der Brecherwalze und an dem Brecherauslauf. Diese Düsen haben einen Nenndurchfluss von 2,53 l/min bei 5 bar Nenndruck. Die Ansteuerung ist beladungsabhängig und wird je nach Beladungshöhe mittels eines Ultraschallsensors geschaltet. Der eingestellte Betriebsdruck bei der Brecherbedüsung ist in Tabelle 7.16 dargestellt. Die Brecherbedüsung erfolgt in einem fast ge-

Tabelle 7.16: Beladungsabhängige Brecherbedüsung.

<b>Beladungshöhe</b>	<b>ab 150 mm</b>	<b>ab 250 mm</b>	<b>ab 350 mm</b>
Betriebsdruck	5 bar	10 bar	15 bar

schlossenen Raum des Walzenbrechers. Die erste Düsenleiste sorgt primär für die Benetzung der gewonnenen Kohle kurz vor dem Brecher und sekundär für die Staubbiederschlagung aus der Luft in dem Einlaufbereich des Brechers. Direkt an der Brecherwalze befindet sich die zweite Düsenleiste, welche den Staub aus dem Mahlprozess verhindern soll. Die dritte Düsenleiste erfüllt dieselben Aufgaben wie die erste Düsenleiste am Brecherauslauf. Hier sind große turbulente Luftströmungsgeschwindigkeiten im geschlossenen Raum zu erwarten.

### 7.3.1 Istzustand

Der Schlagwalzenbrecher im Förderstrang ist komplett eingehaust und mit drei Düsenleisten von je 4 2,5L FS-Düsen bestückt. Diese Düsen sollen den Staub in der Einhausung niederschlagen und dafür sorgen, dass kein Staub daraus entweichen kann. Das Fördergut soll beim Verlassen des Brechers ausreichend befeuchtet sein, um für die späteren Förderschritte nicht als Staubquelle zu dienen.

Volumenstrom

Aus Gleichung 7.1 kann der Volumenstrom der 2,5L FS-Düse bestimmt werden. Die Ergebnisse der Volumenstromberechnung sind in Tabelle 7.17 dargestellt.

Tabelle 7.17: Volumenstrom der 2,5L FS-Düse.

p [bar]	$\dot{V}$ [l/min]
5	2,53
10	3,58
15	4,38

Tropfengröße

Da diese Düsen laut der beladungsabhängigen Steuerung mit nur 3 Druckstufen gefahren werden, wurde nur die Tropfengröße bei diesen Betriebsparametern gemessen. Abbildung 7.16 zeigt die Tropfenverteilungskurven für diese Düse bei den Druckstufen 5, 10 und 15 bar. Diese Flachstrahldüse zeigt ei-

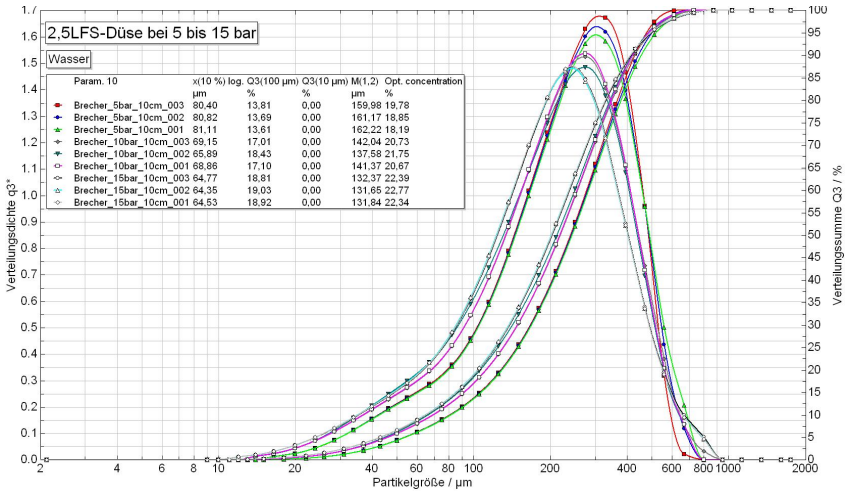


Abbildung 7.16: Tropfengrößenanalyse 2,5L FS-Düse.



ne ziemlich grobe Tropfenverteilung mit Sauterdurchmessern zwischen 132 und 162  $\mu\text{m}$  bei den verwendeten Druckstufen. Eine genaue Analyse des Sprühbildes in Abbildung 7.17 zeigt den Sauterdurchmesser über das gesamte Sprühbild. Bei dieser Flachstrahldüse ist die Tropfenverteilung bei den Abständen, größer als 20 cm, sehr gleichmäßig. Die ausgebildete Tropfenwand besitzt Tropfen mit einem Durchmesser zwischen 119,3 und 136,6  $\mu\text{m}$ . Eine gleichmäßige Verteilung ist für die gute Benetzung einer Oberfläche wünschenswert.

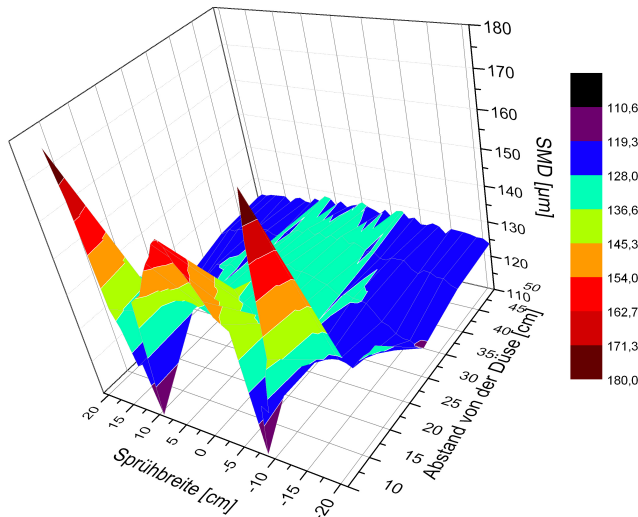


Abbildung 7.17: Sprühbild der 2,5L FS-Düse bei 5 bar.

### **Staubbindung**

Die ermittelte Staubbindeleistung der 2,5L FS-Düse war 23 % bei 15 bar bezogen auf einem Wasserdurchsatz von 4,4 l/min. Damit ergibt sich eine normierte Staubbindeeffektivität von 5,2 % pro l/min. Dieser Wert ist, im Vergleich zu den Vorversuchen im Kapitel 6.3, der schlechteste Wert der gemessen wurde.

Damit zeigt sich diese Düse als ungeeignet für die Staubbiederschlagung aus der Luft. Die erzeugten Tropfen sind viel zu groß, um sich mit den alveolengängigen Staubpartikeln zu binden. Aufgrund der Einhausung des Brechers wird nicht erwartet, dass Wetterströmungen einen Einfluss auf die Wassertropfen haben werden und deswegen wurde keine Betrachtung bezüglich des Driftverhaltens der Tropfen durchgeführt.

### 7.3.2 Sollzustand

Im Brecherbereich sind drei unterschiedliche Maßnahmen durchzuführen. Für den Brechereinlauf soll die zugeführte Kohle vor dem Brechereinsatz befeuchtet werden, um die Staubentstehung beim Brechen zu minimieren. Die zurzeit verwendete Düse erfüllt diese Aufgabe mit ihrer gleichmäßigen Tropfenverteilung über die gesamte Sprühbreite. Lediglich die Wassermenge könnte hier optimiert werden. Die Düsen über der Brecherwalze sollen den gesamten Bereich abdecken, was für den Einsatz einer Vollkegeldüse spricht. Diese Düse muss die frisch entstandenen Staubpartikel sofort binden und niederschlagen. Durch die turbulenten Luftbewegungen, erzeugt durch den Brecher und das Material, würden sich sehr feine Tropfen zu stark ablenken lassen. Eine Simulation dieses Verhältnisses im Windkanal ist nicht möglich. Wünschenswert wäre die Führung von kleineren Tropfen zu den Staubpartikeln, ohne dass sie sich schnell an die Strömungsverhältnisse anpassen. Es ist bekannt, dass Bedüsungssysteme für die Führung von belasteten Wittern im Streb verwendet werden können. Ziel ist es, dieses Prinzip oberhalb der Brecherwalze anzuwenden. Wenn eine Düse im Kern des Sprühbildes kleinere Tropfen erzeugt, welche dann von groberen Tropfen am Sprührand umgrenzt sind, können die kleineren Tropfen, welche für die Staubbiederschlagung am geeignetsten sind, kontrolliert eingesetzt werden. Die Vollkegelstrahldüsen der Vorversuche wiesen bedingt ein solches Verhalten auf. Durch eine Düsengeometrie der Fogmatik Düsen könnte eine noch bessere Ausbildung des Sprühbildes erzielt werden. Diese Düse ist ein Prototyp der protecfire GmbH und ist eine Vollkegeldüse mit einem mechanisch betätigten Schließmechanismus. Durch das Schließen ist die Düse weniger anfällig für Verschmutzungen. Die Aufnahme der Tropfenverteilungen in Abbildung 7.19 zeigt die Tropfenbereiche deutlich. Im breiten Kernbereich des Sprühstrahls sind die

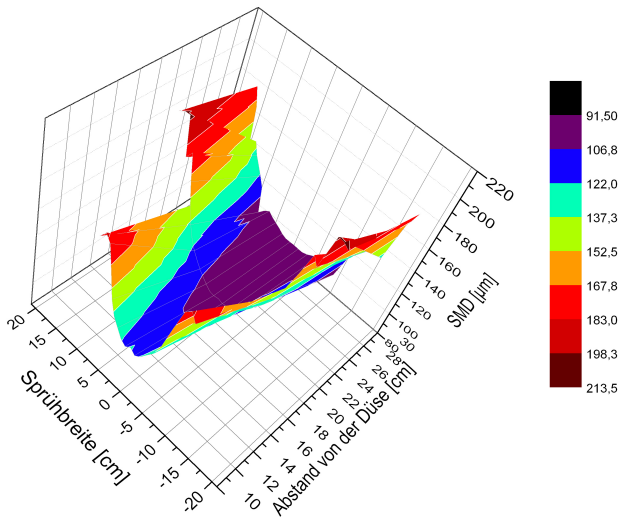


Abbildung 7.18: Sprühbild der FM31-Düse bei 10 bar.

Tropfen alle kleiner  $106,8 \mu\text{m}$ . Dieses feintröpfige Sprühbild ist dann umgeben von einem Mantel aus groben Tropfen, die einen Sauterdurchmesser bis  $213,5 \mu\text{m}$  haben. Damit zeigt diese Düse die gewünschten Charakteristika bezüglich der Tropfenverteilung des Sprühbildes.

Abbildung 7.18 zeigt die Verteilung des Sauterdurchmessers über das gesamte Sprühbild der FM31-Düse. Es ist deutlich zu erkennen, dass die kleinen Tropfen in der Mitte des Sprühbildes ausgeprägt sind und sich ein äußerer Rand von Tropfen mit doppelt so großem Durchmesser gebildet hat. Ein Konus von feinen Tropfen ist in der Mitte erkennbar. Am äußeren Rand ist ein Flügel von groben Tropfen zu sehen. Dieses Sprühbild bleibt bis über 1 m stabil. Die Verwendung einer solchen Düse oberhalb der Brecherwalze kann die Tropfen in dem turbulenten Bereich effektiv mit den Staubpartikeln in Verbindung bringen. Bei einer Messung der Staubbindungsleistung der FM31-Düse wurde 89,7 % des Staubs im Windkanal von der Düse bei einem Betriebsdruck von 15 bar nie-



Abbildung 7.19: Sprühbild der FM31-Düse bei 10 bar.

dergeschlagen. Bei einem Wasserdurchfluss von 8,7 l/min ergibt sich damit eine Staubbindeeffektivität von 10,3 % pro l/min. Die Fogmatik FM31-Düse bindet damit zwei mal mehr Staub als die aktuelle 2,5L FS-Düse.

Am Brecherauslauf herrschen dieselben Bedingungen wie am Brechereinlauf mit dem Unterschied, dass die Kohlestücke kleiner sind.

## 7.4 Übergaben

Die Übergabestelle von dem Kettenförderer zu dem Gurtbandförderer ist mit sechs Vollkegelstrahldüsen (Lechler 400.240.16.01), in der Einlaufverkleidung, in der Abwurfparabel und in der Auslaufverkleidung, ausgestattet. Diese Düsen sind identisch zu den Düsen, die bereits in Kapitel 7.2 beschrieben wurden. Hier gilt es, die Niederschlagung des entstehenden Staubs bei dem Abwurf der Kohle von einer Bandanlage auf die nächste Förderanlage zu unterbinden. Die Ein- und Ausläufe sind offener als bei der Brecherbedüsung, welche je nach Wettergeschwindigkeit eine höhere Luftgeschwindigkeit in dem Bereich ermöglichen. Zusätzlich ist noch der Einfluss der Bandgeschwindigkeit zu beachten. Durch die ähnliche Situation wurde für dieses Bedüsungssystem keine gesonderte Untersuchung durchgeführt.

## 7.5 Förderung

Bei der Staubbekämpfung in der Abförderung der Kohle wird die Brecher- und Übergabebedüsung lauf- und beladungsabhängig gesteuert. Zu den Bedüsungspunkten gehören der Streb/Streckenübergang, der Kohlenbrecher und die Übergaben Ketten-/Gurtbandförderer. Dieser Arbeitsbereich ist in Abbildung 7.20 dargestellt. Die Düsen am Streb/Streckenübergang unterliegen einer besonderen

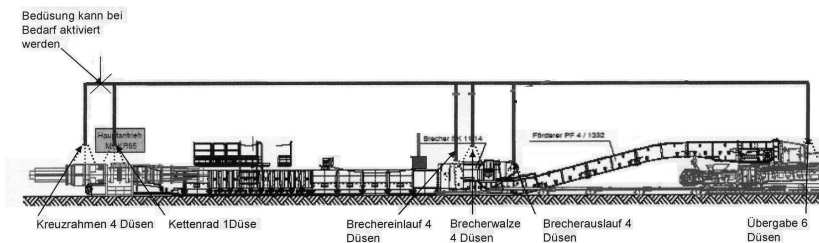


Abbildung 7.20: Bedüsungen in der Förderung.

Staubbekämpfung und werden nur dann eingesetzt, wenn ein hohes Staubauf-

kommen vorherrscht. Eine weitere Betrachtung dieser Düsen wird nicht durchgeführt. Weitere Überlegungen zur Optimierung der Staubbekämpfung in der Förderung können in dem Ausblick in Kapitel 9 nachgelesen werden.

## **7.6 Wasserbilanz**

Bei der Optimierung der Bedüsungssysteme für die Staubbekämpfung bei der langfrontartigen Gewinnung der Steinkohle spielt die gesamte Wasserwirtschaft eine entscheidende Rolle. Das Wasser muss aufbereitet werden, kann zur Belästigung der Mitarbeiter vor Ort führen, bewirkt eine höhere Förderleistung durch die Befeuchtung des Förderguts und kompliziert dadurch auch die Aufbereitung. Tabelle 7.18 zeigt die Wasserbilanz für ein Gewinnungsfeld mit der zurzeit verwendeten Düsen. Ein typischer Hobelbetrieb verbraucht damit ca. 500 l Wasser pro Minute. Bei starker Staubentwicklung werden die Druckeinstellungen der Düsen häufig höher eingestellt, wodurch sich der Wasserverbrauch deutlich erhöht. Bei der Gewinnungsfeldbedüsung bedeutet eine Erhöhung des Betriebsdrucks zwar eine größere Energie in den Tropfen, was für die Benetzung des Kohlenstoßes vorteilhaft ist, führt aber auch zu einem größeren Anteil an feinen Tropfen, welche von den Wettern mitgetragen werden können.

Tabelle 7.18: Wasserbilanz vor der Optimierung.

<b>Anwendung</b>	<b>Betriebs- volumen- strom</b>	<b>Anzahl der Düsen</b>	<b>Anzahl der Schilde</b>	<b>Gesamt- volumen- strom</b>
Laola Kappen- dach	4 l/min	8	1	32 l/min
Laola Bruch- schild	4 l/min	2	1	8 l/min
Laola Bruchraum	3,9 l/min	2	1	7,8 l/min
Schreitvorgang Kappendach	4 l/min	8	3	96 l/min
Schreitvorgang Bruchschild	4 l/min	2	3	24 l/min
Schreitvorgang Bruchraum	4,3 l/min	2	3	25,8 l/min
Gewinnungsfeld	8,7 l/min	1	24	208,8 l/min
Kohlenbrecher	4,4 l/min	12		52,8 l/min
Übergabe Förde- rer/Gurtband	4,3 l/min	6		25,8 l/min
Gesamtwasser- bedarf				481 l/min

Tabelle 7.19 zeigt die Wasserbilanz für dasselbe Abbaufeld nach der Optimierung der Bedüsungssysteme. Hier wird nur geringfügig mehr Wasser verbraucht.

Tabelle 7.19: Wasserbilanz nach der Optimierung.

<b>Anwendung</b>	<b>Betriebsvolumenstrom</b>	<b>Anzahl der Düsen</b>	<b>Anzahl der Schilde</b>	<b>Gesamtvolumenstrom</b>
Laola Kappendach	4 l/min	8	1	32 l/min
Laola Bruchschild	4 l/min	2	1	8 l/min
Laola Bruchraum	1,9 l/min	2	1	3,8 l/min
Schreitvorgang Kappendach	4 l/min	8	3	96 l/min
Schreitvorgang Bruchschild	4 l/min	2	3	24 l/min
Schreitvorgang Bruchraum	1,7 l/min	2	3	10,2 l/min
Gewinnungsfeld	11,0 l/min	1	24	264 l/min
Kohlenbrecher	8,7 l/min	6		52,2 l/min
Übergabe Förderer/Gurtband	1,9 l/min	6		11,4 l/min
Gesamtwasserbedarf				501,6 l/min

Die Verbesserung in der Staubbekämpfung steigt aber dabei enorm. Bei der Gewinnungsfeldbedüsung steigt die Benetzung des Kohlenstoßes um einen Faktor von 2,2. Diese verbesserte Befeuchtung macht sich in der Staubentstehung deutlich bemerkbar. Es muss dadurch weniger Aufwand bei der Staubniederschlagung aus der Luft betrieben werden. Die Niederschlagung von Brecherstaub an der Brecherwalze wird mit der gleichen Wassermenge verdoppelt.



## 8 Zusammenfassung

Bei der Gewinnung von Steinkohle unter Tage ist der Schutz der Mitarbeiter vor Grubenstäuben eine zentrale Aufgabe des Arbeits- und Gesundheitsschutzes und somit von Interesse für die Forschung. Um die Verbreitung der Quarzstaublungenerkrankung zu vermeiden, muss der Inhalation hoher Konzentrationen alveolengänger quarzhaltiger Stäube vorgebeugt werden. Kontinuierliche Entwicklungen bei der Maschinentechnik haben zu deutlichen Verbesserungen der Staubbelastung unter Tage geführt. Mit den steigenden Förderraten steigt auch die Gefahr von erhöhten Staubkonzentrationen. Damit steigt auch die Notwendigkeit der unterstützenden Staubbekämpfungsmaßnahmen durch Bedüsungssysteme, welche bis jetzt eine zweitrangige Position bei der Entwicklung von Maßnahmen bei der technischen Staubbekämpfung hatten.

Die Aufgabe von Bedüsungssystemen ist zweifältig. In erster Linie sollen die Bedüsungsvorrichtungen für eine Befeuchtung des Kohlenstoßes oder des Fördergutes sorgen, um damit der Staubenstehung entgegen zu wirken. Diese Aufgabe wird bei der Gewinnungsfeldbedüsung durch das Befeuchten des Kohlenstoßes, bei der Kappendachbefeuchtung durch das Befeuchten des Bergepolsters auf dem Ausbauschild und bei den Brecher- und Übergabenbedüsungen durch die Befeuchtung des Förderguts verwirklicht. Die erste Priorität bei der technischen Staubbekämpfung liegt in der Minimierung der Stauberzeugung. Das Entfernen von Schwebestäuben aus der Luft gestaltet sich dabei immer schwieriger. Die zweite Aufgabe der Bedüsungssysteme ist die Niederschlagung dieser Schwebestäube bevor sie weiter von den Wettern mitgetragen und dadurch von den Arbeitern unter Tage eingeatmet werden können. Zu den Staubquellen bei der Gewinnung von Steinkohle unter Tage gehören die Gewinnungsgeräte, der Schildausbau, die Brecher und die Förderung.

Eine Optimierung der Bedüsungssysteme bedurfte zuerst einer Analyse des Istzustandes und der Betriebs- und Umgebungsparametern. Hierzu gehörte für

jede Düse eine Betrachtung des Volumenstroms, des Sprühwinkels, der Spritzbreite, der Tropfengröße und des Sprühbilds. Um diese Eigenschaften zu messen, wurde der Staubprüfstand am Institut für Bergbau der TU Clausthal erweitert. Der Volumenstrom war ausschlaggebend für die Wasserbilanz des Systems und der Feuchtegehalt in der Förderung. Der Sprühwinkel und die Spritzbreite zeigten, welche Fläche von der Düse abgedeckt werden konnte. Die Tropfengröße und das Sprühbild waren entscheidend für das Staubbindervermögen sowie für die Stabilität und das Driftverhalten der Düse. Zu den einflussreichen Betriebs- und Umgebungsparametern steht auf der Düsenseite der Betriebsdruck, welcher für die meisten Sprühcharakteristika entscheidend ist. Die wettertechnischen Verhältnisse stellen von der Umgebungsseite den kritischsten Parameter mit der Wettergeschwindigkeit dar.

Die Wettergeschwindigkeit ist im Streb am höchsten und hat dort den größten Einfluss auf das Bedüsungssystem. Die Gewinnungsfeldbedüsung bewirkt das Befeuchten des Kohlenstoßes vor der Gewinnung und des Fördergutes im Kettenkratzerförderer. Dadurch wird die Entstehung von Staub bei der Gewinnung und der ersten Förderstrecke verhindert. Die sekundäre Aufgabe ist die Niederschlagung vom Schwebstaub im Streb. Um diese Aufgaben zu erfüllen, muss mit der Gewinnungsfeldbedüsung sicher gestellt werden, dass die erzeugten Tropfen den Kohlenstoß erreichen. Zu der Düse muss ein ausreichend breiter Sprühstrahl, eine genügende Sprühstabilität, ein grobes Tropfenbild und ein widerstandsfähiges Driftverhalten gehören. Dies wird von der aktuell eingesetzten 5L Vollkegelstrahldüse nur bei geringeren Wettergeschwindigkeiten erreicht. Bei höheren Wettergeschwindigkeiten wird das feine Tropfenspektrum von den Werten mitgetragen und erreicht nicht komplett den Kohlenstoß und führt zu einer Belästigung der abwetterseitig stehenden Mitarbeiter. Als besser geeignete Düse wurde eine 6L Flachstrahldüse für die Gewinnungsfeldbedüsung identifiziert, mit der auch bei Wettergeschwindigkeiten von 6 m/s eine garantierte Befeuchtung des Kohlenstoßes stattfindet.

Ein Großteil der Bedüsungssysteme ist in den Bereichen mit geringeren Wettergeschwindigkeiten installiert, wo das Driftverhalten der Tropfen nicht die wichtigste Eigenschaft darstellt. Hierzu gehört die Heckraum-, Brecher- und Übergabenbedüsung. Die Heckraumbedüsung soll die Staubquelle „Alter Mann“ beherrschen. Nach dem Rückvorgang des Schildausbaus fällt das Hangende

zu Bruch und erzeugt dadurch einen quarzhaltigen Staub. Diese Düsen sollen den Staub im Alten Mann niederschlagen und von dem Streb fernhalten. Das Bedüsungssystem kann durch eine Verlängerung der Sprühdauer und Erzeugung einer feintröpfigen Wand zum Streb optimiert werden. Einen Austausch der bestehenden 2,5L Vollkegelstrahldüsen mit Düsen kleinerer Tropfenkollektive und geringerer Durchflussmengen führt zu diesem Ziel. Gleiches gilt für die Übergabenbedüsung.

Die Brecherbedüsung stellt andere Anforderungen an das System. Das Fördergut soll vor dem Brechvorgang ausreichend befeuchtet werden um die Stauberzeugung beim Zerkleinern so gering wie möglich zu halten. Dies wird erfolgreich von den aktuellen Düsen erreicht. In dem zweiten Schritt muss der Staub über der Brecherwalze niedergeschlagen werden. Die aktuellen Flachstrahldüsen erreichten am Prüfstand nur geringe Staubbekämpfungswerte. Ein geeigneter Prototyp als Vollkegeldüse wurde für diese Aufgabe erfolgreich getestet. Diese Düse steuert die kleinen Tropfen, die am effektivsten Staub binden können, mit seinem Sprühbild an den Staubentstehungsort. Im Prüfstand war eine 3,2-fach Verbesserung der Staubniederschlagung von dieser Düse zu vermerken.

Zurzeit werden die Düsen der Gewinnungsfeldbedüsung bei der RAG Deutschen Steinkohle AG mit der vorgeschlagenen 6L-Flachstrahldüse aufgrund dieser Untersuchungen in Betrieb genommen. Zusätzlich wurde ein Brecherversuch mit dem Vollkegeldüsenprototyp gestartet.



## 9 Ausblick

Weitere Optimierungspotenziale für die Bedüsungssysteme werden sich nach der Einführung der Düsen unter Tage zeigen. Nicht nur in der Bedüsungs-, sondern auch in der Steuerungstechnik wurden Schwachstellen festgestellt und somit weiteres Verbesserungspotential entdeckt. Zurzeit erfolgt eine beladungsabhängige Steuerung der Bedüsungssysteme in der Förderung. Die Staubentwicklung ist aber nicht nur von der Menge und Größe des Förderguts abhängig, sondern auch von der Zusammensetzung des Fördergutes. Der Bergeanteil in der Förderung hat einen bedeutenden Einfluss auf die Staubentwicklung. Durch eine beladungs- und bergeanteilabhängige Steuerung der Bedüsungsvorrichtungen kann das System noch besser werden. Die benötigte Wassermenge für eine gewisse Fördermenge mit gegebenem Bergeanteil kann in Versuchen untersucht werden. Aus den Ergebnissen kann dann die Steuerung programmiert werden, um die optimale Wassermenge für die Befeuchtung des Fördergutes zu bestimmen. Dadurch würde ein sicherer Betrieb gewährleistet werden ohne das Fördergut zu stark mit Wasser zu belasten.



# Literaturverzeichnis

- [1] DIN ISO 9276-1, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 1: Grafische Darstellung.
- [2] ISO13320 - Particle size analysis - Laser diffraction methods.
- [3] Lechler: Präzisionsdüsen und Zubehör, Edition 108.
- [4] Merkblatt zur Berufskrankheit Nr. 4101 der Anlage zur Berufskrankheiten-Verordnung: Bek. des BMA vom 3. Februar 1998 - IVa 4-45206-4101/4102.
- [5] Bergverordnung zum gesundheitlichen Schutz der Beschäftigten (Gesundheitsschutz-Bergverordnung–GesBergV), 1991.
- [6] DIN EN 481, Ausgabe: 1993-09, Arbeitsplatzatmosphäre–Festlegung der Teilchengrößenverteilung zur Messung luftgetragener Partikel, September 1993. DIN 481.
- [7] Allgemeine Bundesbergverordnung (ABBergV), 1995.
- [8] Bergverordnung für die Steinkohlenbergwerke (BVOST), 2001.
- [9] DIN ISO 9276-2, Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 2: Berechnung von mittleren Partikelgrößen/-durchmessern und Momenten aus Partikelgrößenverteilungen, 2006.
- [10] Spraying Systems: Düsen und Zubehör für die Industrie, Katalog 70-M, 2008.
- [11] Korfmann Lufttechnik GmbH, 06 2011.
- [12] RAG Deutsche Steinkohle AG, 06 2011.

- 
- [13] ARDELT, M.-G. Staubbekämpfung in Betrieben der schniedenden und schälenden Kohlengewinnung, Teil II: Schälende Gewinnung. Tech. Rep. 7260-02/058/01, Bergbau-Forschung GmbH, Essen, 1989.
- [14] ARMBRUSTER, L. 50 Jahre Kohleforschung - Staubbekämpfung. *Glückauf* 139, 10 (2003), 546–551.
- [15] BAUCKHAGE, K. Das Zerstäuben als Grundverfahren. *Chem. Ing. Tech.* 62(8) (1990), 613–625.
- [16] BAUER, M. J., AND ENGELDINGER, A. Staubschutz im Steinkohlenbergbau. *Glückauf* 131 (1995), 293–300.
- [17] BAYVEL, L., AND ORZECOWSKI, Z. Liquid Atomization, 1993.
- [18] BAZZANELLA, A., BECKER, H., AND KEMPER, F. Staubbekämpfung in Abbaubetrieben mit schniedender Kohlengewinnung. *Glückauf* 122, 11 (1986), 728–735.
- [19] BÜCHTE, S. Staub ist nicht gleich Staub: Begriffserklärung und gesetzliche Rahmenbedingungen. In *Herausforderung Staub - Beiträge des Instituts für Arbeitswissenschaften der RAG AG*. econsense, Berlin, 2006.
- [20] BÜCHTE, S., BURGGRAF, C., MCCLURE, B., LANGEFELD, O., MORFELD, P., AND PIEKARSKI, C. Untersuchung des Einflusses von Messstrategie und Messgerät auf die bei Staubmessungen ermittelte Kohlengruben-A-Staubkonzentration auf fünf Steinkohlenbergwerken in den USA unter Einsatz von deutscher und amerikanischer Staubmesstechnik. In *Klimatisierung und Ergonomie in untertägigen Hohlräumen* (2004), O. Langefeld, Ed., pp. 221–234.
- [21] BISCHOFF, W., BRAMANN, H., DÜRRER, F., MOEBIUS, F., QUADFASEL, H., AND SCHLÜTER, W. *Das kleine Bergbaulexikon*. VGE Verlag GmbH, 2010.
- [22] BRAUER, H. *Grundlagen der Einphasen- und Mehrphasenstromungen*. Sauerländer, Aarau u. Frankfurt/M, 1971.



- [23] BREUER, H. Fortschritte bei der Staub- und Silikosebekämpfung. *Glückauf* 18 (1972), 806–814.
- [24] CHEKAN, G., RIDER, J., LISTAK, J., COLINET, J., AND POTTS, J. Impact of air velocity and support advance on shield-generated dust. *Min. Eng.* 62(4) (2010), 57–63.
- [25] CHENG, L., AND ZUKOVICH, P. Respirable dust adhering to run-of-face bituminous coals. Tech. rep., Bureau of Mines, Washington, DC (USA), 1973.
- [26] COLINET, J., RIDER, J., AND THIMONS, E. Controlling respirable dust in underground coal mines in the united states. Tech. rep., National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2008.
- [27] COLINET, J., SPENCER, E., AND JANKOWSKI, R. Status of dust control technology on us longwalls. In *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress* (1997), pp. 17–22.
- [28] COLINET, J., AND THIMONS, E. Dust control practices for underground coal mining. Tech. rep., The National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 2008.
- [29] DODGE, L. G. Change of calibration of diffraction-based particle sizers in dense sprays. *Optical Engineering* 23 (1984), 626–630.
- [30] DUMOUCHEL, C., YONGYINGSAKTHAVORN, P., AND COUSIN, J. Light multiple scattering correction of laser-diffraction spray drop-size distribution measurements. *International Journal of Multiphase Flow* 35, 3 (2009), 277–287.
- [31] ENGELDINGER, A., HOMBERG, F., KOLLING, P., AND DECKER, A. Sensorgesteuerte Bedüsung an Brecheranlagen zur Verminderung der Staubbelastung. *Glückauf* 129 (1993), 358–361.
- [32] FELTON, P., HAMIDI, A., AND AIGAL, A. Measurement of drop size distribution in dense sprays by laser diffraction. In *IN: ICLASS-85; Proceedings of the Third International Conference on Liquid Atomisation and Spray*

- Systems, London, England, July 8-10, 1985. Volume 2 (A87-13826 03-34). London, Institute of Energy, 1986, p. IVA/4/1-IVA/4/11. Research supported by the Ministry of Defence, British Council, and SERC. (1986), vol. 2.*
- [33] FESKOV, M. I., AND DUCKE, G. Neuartige Sprühsysteme für zweistufige Flüssigkeitszerstäubung. *Glückauf* 55 (1994), 122–124.
  - [34] FESKOV, M. I., AND DUCKE, G. Eine wirksame Staubbekämpfungseinrichtung an Übergabestellen von Bandförderanlagen. *Glückauf* 58 (1997), 114–117.
  - [35] GOMI, H. Multiple scattering correction in the measurement of particle size and number density by the diffraction method. *Applied optics* 25, 19 (1986), 3552–3558.
  - [36] GÖRETZ, H. Staubbekämpfung am Schreitausbau. Tech. rep., Bergbau-Forschung GmbH, Essen, 1987.
  - [37] GULDNER, K., AND BESCHORNER, F. Gib dem Staub keine Chance! Tech. rep., Berufsgenossenschaft der keramischen und Glas-Industrie, 2005.
  - [38] GUNTAU, A. Anleitungen für die Staubbekämpfung. *Glückauf* 130 (1994), 267–269.
  - [39] GUNTAU, A., AND MENDE, H. Dust suppression at RAG before and after the coming into force of the mining health protection regulations [Staubbekämpfung bei der RAG vor und nach Inkrafttreten der Gesundheitsschutz-Bergverordnung]. *Glückauf: Die Fachzeitschrift für Rohstoff, Bergbau und Energie* 132, 8 (1996), 539–548.
  - [40] HARTMANN, U. MC-GmbH Düsenkatalog, 06 2011.
  - [41] HENKE, B., AND ARDELT, M.-G. Optimierung von Hobelgassenbedüsungsanlagen. *Glückauf* 127 (1991), 626–665.
  - [42] HENKE, B., AND ARDELT, M.-G. Fördermengenabhängige Bedüsung für die schälende Kohलगewinnung. *Glückauf* 1995 (1995), 414–418.

- [43] HENKE, B., AND ARDELT, M.-G. Verbesserung der Staubbekämpfung am Schreitausbau. *Silikosebericht Nordrhein-Westfalen 19* (1995), 45–58.
- [44] HENKE, B., AND CHURIC, N. Staubbekämpfung am Schlagwalzenbrecher mit Hochdruckwasser. *Glückauf 130* (1994), 646–649.
- [45] HENKE, B., AND RICHTER, H.-O. Planungshilfe für die Staubbekämpfung am Walzenschrämlader. *Glückauf 127* (1991), 763–770.
- [46] HENKE, B., AND STOCKMANN, H.-W. Stand und Entwicklung der Entstaubungstechnik im maschinellen Streckenvortrieb. *Glückauf 53* (1992), 24–28.
- [47] HESSE, F. Staubbekämpfung im Langfrontbergbau. *Glückauf 132* (1996), 90–96.
- [48] HINZE, J. O. Fundamentals of the hydrodynamic mechanism of splitting in dispersion processes. *A.I.Ch.E. Journal 1(3)* (1955), 289–295.
- [49] HIRLEMAN, E. D. Modeling of multiple scattering effects in fraunhofer diffraction particle size analysis. *Particle & Particle Systems Characterization* 5, 2 (1988), 57–65.
- [50] HU, Q., POLAT, H., AND CHANDER, S. *Emerging Process Technologies for a Cleaner Environment*. Society for Mining, Metallurgy & Exploration, 1992, ch. Effect of Surfactants in Dust Control by Water Sprays, pp. 269–276.
- [51] JACOB, D. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton University Press, 1999.
- [52] JANKOWSKI, R., KISSELL, F., AND DANIEL, J. Longwall dust control: an overview of progress in recent years. *Min. Eng.* (1986), 953–958.
- [53] JANKOWSKI, R., ORGANISCAK, J., AND JAYARAMAN, N. Dust sources and controls on high tonnage longwall faces. Tech. rep., Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc. US Bureau of Mines, Pittsburgh, Pennsylvania, 1990.

- [54] KADOW, T., SÜDHOFER, F., AND HENKE, B. Tränkverzicht in Gewinnungsbetrieben im Ruhrkarbon. *Glückauf* 140 (2004), 102–109.
- [55] KIM, J., AND TIEN, J. C. Enhanced dust suppression using surfactants. In *Proceedings of the 6th US Mine Ventilation Symposium* (1993).
- [56] KISSELL, F. *Handbook for Dust Control in Mining*. US Department of Health and Human Services (CDC, NIOSH), Pittsburgh, PA, 2003, ch. Dust control methods in tunnels and underground mines, pp. 3–22.
- [57] KRAUSE, C., GRETZKI, T., NÜRNBERGER, F., SCHAPER, M., AND BACH, F. Messung der Spraycharakteristik zur Bestimmung des Wärmeübergangskoeffizienten bei der Spraykühlung. *Forschung im Ingenieurwesen* 70, 4 (2005), 237–242.
- [58] KREMER, M. Staubbekämpfung in der Gewinnung. *Glückauf* 130 (1994), 99–101.
- [59] LEFEBVRE, A. *Atomization and sprays*. CRC, 1989.
- [60] LIN, S., AND REITZ, R. Drop and spray formation from a liquid jet. *Annual Review of Fluid Mechanics* 30, 1 (1998), 85–105.
- [61] LUDLOW, J., AND JANKOWSKI, R. Use lower shearer drum speeds to achieve deeper coal cutting. *Min. Eng.* 36, 3 (1984), 251–255.
- [62] MAUCHER, B., AND REINHARDT, M. Staubbekämpfung im Rahmen der Gesundheitsschutz-Bergverordnung bei der Ruhrkohle Niederrhein AG. *Glückauf* 128 (1992), 94–98.
- [63] MCPHERSON, M., AND HINSLEY, F. *Subsurface ventilation and environmental engineering*, vol. 131. Chapman & Hall, 1993.
- [64] MIKKI, P. Stand der Technik bei der Staubbekämpfung im Berg- und Tunnelbau. *Glückauf* 141 (2005), 93–97.
- [65] MORFELD, P., AND PIEKARSKI, C. Neue Erkenntnisse zur Bewertung von Kohlengrubenstaub. *Glückauf* 130 (1994), 111–114.

- [66] MUKHERJEE, S., SINGH, M., AND JAYARAMAN, N. Design guidelines for improved water spray systems. *Min. Eng.* 38, 11 (1986), 1054–1059.
- [67] ORGANISCAK, J., KHAIR, A., AND AHMAD, M. Studies of bit wear and respirable-dust generation. *TRANSACTIONS-SOCIETY FOR MINING METALLURGY AND EXPLORATION INCORPORATED* 298 (1995), 1874–1879.
- [68] ORGANISCAK, J., PAGE, S., AND JANKOWSKI, R. *Relationship of coal seam parameters and airborne respirable dust at longwalls*. US Dept. of the Interior, Bureau of Mines, 1992.
- [69] PARACELUS. *Von der Bergsucht oder Bergkranckheiten drey Bücher*. 1567.
- [70] PAVIA, D. Bronchoalveolar clearance. *Respiration* 58, 1 (1991), 13–17.
- [71] PIEKARSKI, C. Feinstaub als Herausforderung für die Industrie - Eine historische Zeitreise durch die Welt des Bergbaus. In *Herausforderung Staub - Wissenschaftliche Beiträge des Instituts für Arbeitswissenschaften der RAG Aktiengesellschaft*. ecosense, Berlin, 2006.
- [72] REINHARDT, M. Staubmesstechnik bei besonderen Betriebsbedingungen. *Glückauf* 130 (1994), 106–110.
- [73] RICHTER, T. *Zerstäuben von Flüssigkeiten: Düsen und Zerstäuber in Theorie und Praxis*. expert-Verl., 2004.
- [74] RIDER, J., AND COLINET, J. *Best Practices for Dust Control in Coal Mining*. US Department of Health and Human Services (CDC, NIOSH), Pittsburgh, PA, 2010, ch. Controlling respirable dust on longwall mining operations, pp. 17–39.
- [75] RIDER, J., COLINET, J., AND PROKOP, A. Impact of control parameters on shearer-generated dust levels. *TRANSACTIONS-SOCIETY FOR MINING METALLURGY AND EXPLORATION INCORPORATED* 312 (2002), 28–34.
- [76] RUGGIERI, S., AND JANKOWSKI, R. Fundamental approaches to longwall dust control. *Transactions* 276 (1983), 1964–1969.

- 
- [77] SCHMIDT, P., AND WALZEL, P. Zerstäuben von Flüssigkeiten. *Chem. Ing. Tech.* 52, 4 (1980), 304–311.
- [78] SCHULZ, H.-M., HAGEMANN, H. W., AND WOLF, M. Geologische Einflussfaktoren auf Staublungenerkrankungen im Steinkohlenbergbau, journal = Glückauf-Forschungshefte. 32–35.
- [79] SHARAN, S., SRIKANTH, R., LIU, P., SUN, G., BELLE, B. K., AND RAMANI, R. V. Dust contamination of panel/face intake air. In *Proceedings of the 6th International Mine Ventilation Congress* (1997).
- [80] SPIER, R. A. *Untersuchung von Einflussfaktoren bei der Staubreduzierung durch Bedüsung am Beispiel der schneidenden Gewinnung im Steinkohlenbergbau*. PhD thesis, Technische Universität Clausthal, 2010.
- [81] SRIKANTH, R., SUBOLESKI, S., MIOLA, W., AND RAMANI, R. Contribution of shield movement to airborne dust levels in longwall faces. *Min. Eng.* June (1995), 570–574.
- [82] STRICKLIN, J. H., AND HANEY, R. A. Longwall dust control practices. Tech. rep., Coal Mine Safety and Health (MSHA), 1999.
- [83] THIEMANN, M. Ermittlung und Beurteilung von Staubquellen und technischen Staubbekämpfung. *Glückauf-Forschungshefte* 53 (1992), 231–238.
- [84] TOMB, T., ONDREY, R., STOLTZ, R., HANEY, R., NOVAKOWSKI, D. C., ATCHISON, D., AND GERBEC, E. *AIME Transactions Vol. 288*. SME, 1991, ch. Evaluation of respirable dust control in longwall mining operations, pp. 1874–1878.
- [85] ULRICH, J., AND STEPANSKI, M. Use of the laser diffraction technique for particle size measurement at high suspension densities. *Particle & Particle Systems Characterization* 7, 1-4 (1990), 25–29.
- [86] VALDENAZZI, L. On the form of a jet issuing from a swirl atomizer. *Archive of Applied Mechanics* 24 (1956), 330–340. 10.1007/BF00538425.
- [87] VON BARDELEBEN, H.-J. Erfahrungen mit der Gesundheitsschutz-Bergverordnung. *Glückauf* 130 (1994), 94–97.

- 
- [88] WALZEL, P. Auslegung von Einstoff-Druckdüsen. *Chem. Ing. Tech.* 54, 4 (1982), 313–328.
- [89] WALZEL, P. Zerstäuben von Flüssigkeiten. *Chem. Ing. Tech.* 62, 12 (1990), 983–994.
- [90] WANG, Y., TIEN, J., WILSON, J., AND ERTEN, M. Use of surfactants for dust control in mines. In *Proceedings of the 5th US Mine Ventilation Symposium* (1991), pp. 3–5.
- [91] WEBER, C.-P., AND BAUER, M. J. Staubbekämpfung ausserhalb der Gewinnung. *Glückauf* 130 (1994), 102–104.
- [92] WOLTER, N., GESSNER, D., KOLLING, P., HEMMER, W., AND LEMMES, F. Ejektor- oder Schneidspurbedüsung für die Staubbekämpfung an Schrämwälzen. *Glückauf* 128 (1992), 366–371.
- [93] WONDRAK, W., LÖHNING, H.-D., SCHEIDUNG, J., AND HENKE, B. Meißelbedüsung an Walzenschrämladern. *Glückauf* 130 (1994), 510–512.
- [94] WOZNIAK, G. *Zerstäubungstechnik: Prinzipien, Verfahren, Geräte*. Springer-Verlag, 2003.